

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky 410

Vytvoření programu pro kružnicový diagram EOP
Software Development for Circle Diagram of Electric Arc
Furnace

2014

Bc. Šimon Robenek

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Šimon Robenek

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Vytvoření programu pro kružnicový diagram EOP
Software Development for Circle Diagram of Electric Arc Furnace

Zásady pro vypracování:

1. Elektrická oblouková pec (EOP), krátká cesta EOP
2. Kruhový diagram, pracovní charakteristiky EOP
3. Volba programovacího jazyka a vývojového prostředí
4. Koncepce a popis programu
5. Možnosti využití vytvořeného programu, zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Hradílek, Z., Lázníčková, I., Král, V. Elektrotepelná technika. Praha: ČVUT Praha 2011. ISBN 978-80-01-043938-9
- [2] Hradílek, Z. a kol. Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy. Skriptum. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001
- [3] Hradílek, Z. a kol. Elektrotepelná zařízení. Praha: IN-EL Praha, 1997
- [4] Rada, J. a kol. Elektrotepelná technika. Praha: SNTL Praha, 1985
- [5] Gavlas, J., Židek, J. Elektrické teplo - návody do cvičení. Skriptum. Ostrava: VŠB Ostrava, 1990

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vladimír Král, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 1. května 2014



Bc. Šimon Robenek

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Královi, Ph.D. za odbornou pomoc a poskytnutí konzultací a materiálů pro vypracování této práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je vytvoření softwarové aplikace, která bude vykreslovat kružnicový diagram elektrické obloukové pece. Práce se zabývá základními vztahy a poznatky pro elektrickou část obloukové pece a algoritmem pro vykreslování kružnicového diagramu. Aplikace je naprogramována pomocí objektově orientovaného programovacího jazyka C# a je přiložena k této práci na CD. Pomocí popisované aplikace lze demonstrovat nebo analyzovat provozní stavy elektrické části elektrické obloukové pece.

Klíčová slova: elektrická oblouková pec, kružnicový diagram, software, programovací jazyk C#

Abstract

The aim of this thesis is to create a software application that will plot a circle (power) diagram of the electric arc furnace. The work deals with basic relations and knowledge of the electrical arc furnace and the algorithm for plotting circle diagram of electric arc furnace. The application is programmed using the object-oriented programming language C # and is attached to this thesis on the CD. Using the application described we can demonstrate or analyze operating conditions of the electric arc furnace.

Keywords: electric arc furnace, circle diagram, software, programming language C#

Seznam použitých symbolů a zkratk

F	(N)	Síla
I	(A)	elektrický proud
L	(H)	indukčnost
M	(H)	vzájemná indukčnost
P	(W)	činný výkon
Q	(var)	jalový výkon
R	(Ω)	činný odpor
S	(VA)	zdánlivý výkon
T	(s)	perioda
U	(V)	elektrické napětí
Z	(Ω)	impedance
I_{km}	(A)	zkratový proud
P_0	(W)	výkon na oblouku
P_{knT}	(W)	činné ztráty transformátoru
P_{P0max}	(W)	maximální výkon na oblouku
ΔP_{ztrat}	(W)	ztrátový výkon
R_0	(Ω)	Odpor oblouku
R_C	(Ω)	celkový odpor krátké cesty a oblouku
R_F	(Ω)	Schwabeho koeficient
R_S	(Ω)	stejnoseměrný odpor vodičů
R_T	(Ω)	činný odpor transformátoru
S_T	(VA)	zdánlivý výkon transformátoru
S_{TL}	(VA)	kompensační výkon tlumivky
$U_{0(n)}$	(V)	sekundární napětí transformátoru
$U_{0\text{max}}$	(V)	maximální sekundární napětí
U_{1n}	(V)	primární napětí transformátoru
X_T	(Ω)	reaktance transformátoru
X_{TL}	(Ω)	reaktance tlumivky
R_k	(Ω)	odpor krátké cesty
R_{kon}	(Ω)	kontaktní odpor
U_n	(V)	jmenovité napětí
a	(cm)	vzdálenost
$\cos\varphi_k$	(—)	účinník zkratového proudu

$\cos\varphi$	(—)	účinník
d	(m)	délka
f	(Hz)	frekvence
$i(t)$	(A)	okamžitá hodnota proudu
k_b	(—)	koeficient jevu blízkosti
k_s	(—)	koeficient povrchového jevu
l	(m)	délka
$meritkoIU_{0(n)}$	(A · mm ⁻¹)	měřítka proudu
$meritkoPQ$	(W · mm ⁻¹)	měřítka grafu
n	(—)	koeficient
$polomerS_T$	(VA · mm ⁻¹)	poloměr kružnice zatížení transformátoru
$polomerU_{0(n)}$	(V · mm ⁻¹)	poloměr napěťové kružnice
r_k	(mm)	poloměr kružnice
$u(t)$	(V)	okamžitá hodnota napětí
u_k	(%)	napětí nakrátko
u_r	(%)	činná složka napětí nakrátko
u_x	(%)	reaktanční složka napětí nakrátko
$x_{\%}$	(%)	rázová reaktance tlumivky
η_{el}	(%)	elektrická účinnost
ρ_{20}	(Ω · mm ² · m ⁻¹)	měrný elektrický odpor (při 20°C)
Δt	(Hz)	perioda vzorkování
$\Delta\vartheta$	(°C nebo °F)	teplotní rozdíl
α	(°F ⁻¹)	teplotní součinitel materiálu
β	(%)	zatížení transformátoru
δ	(mm)	hloubka vniku
μ	(H · m ⁻¹)	permeabilita
φ	(°)	úhel
ω	(rad · s ⁻¹)	úhlová rychlost

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Elektrická oblouková pec obecně	1
1.2	Historie EOP	2
1.3	Základní rozdělení EOP	3
2	Popis základní konstrukce EOP	4
3	Elektrické zařízení EOP	5
3.1	Hlavní vypínač a odpojovač	5
3.2	Tlumivka	6
3.3	Pecní transformátor	7
3.4	Krátká síť	9
3.4.1	Výpočet a konstrukční provedení krátké sítě	12
3.4.2	Výpočet činných odporů	12
3.4.3	Výpočet induktivních odporů[11]	14
4	Kruhový diagram EOP	17
4.1	Podmínka hoření oblouku	23
4.2	Maximální výkon pece a oblouku	23
4.2.1	Maximální výkon pece	24
4.2.2	Maximální výkon na oblouku	25
5	Elektrické pracovní charakteristiky	27
6	Výběr programovacího prostředí	28
8	Koncepce programu a jeho popis	30
8.1	Algoritmus vykreslení kružnicového diagramu	30
8.2	Popis programu	40
9	Závěr	44
10	Literatura	45
11	Přílohy na CD	46

1 Úvod

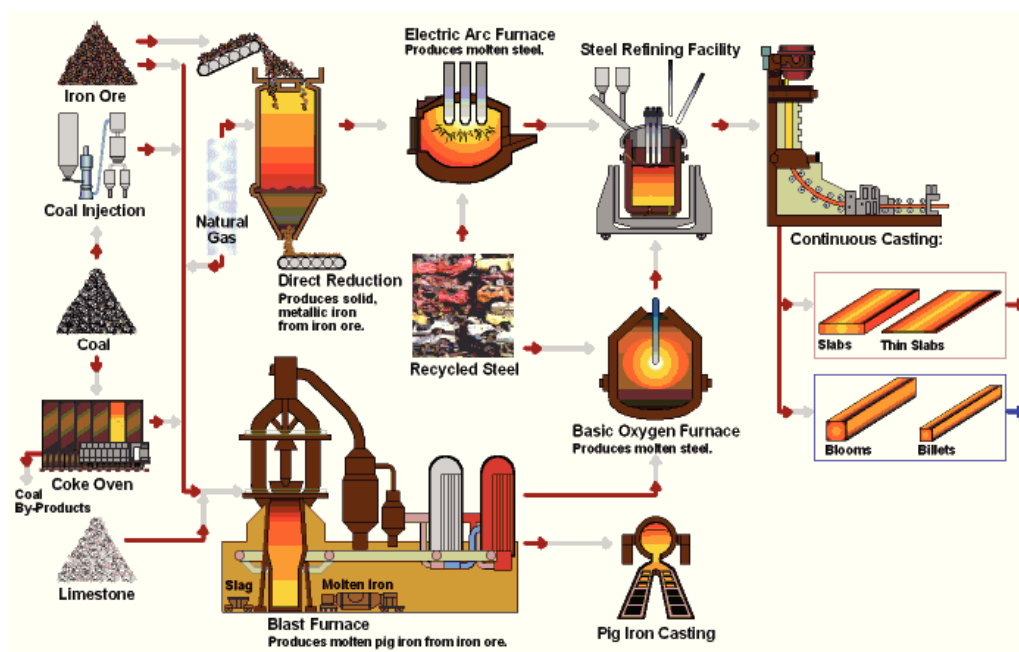
Pro vytvoření programu, který bude vykreslovat kružnicový diagram obloukové pece, je nutné se nejprve seznámit s technologií tohoto metalurgického zařízení, následně pochopit principy vykreslování a naleznout sounáležitosti potřebné ke konstrukci tohoto diagramu. Dále je potřeba matematicky popsat algoritmus, který bude využit pro sestavení zmíněného programu. Tato diplomová práce je rozdělená do několika kapitol; v prvních dvou kapitolách se zabývá historií, začleněním a popisem základní konstrukce elektrické obloukové pece. V další kapitole jsou rozebrány jednotlivé konstrukční části jejího elektrického zařízení společně s výpočtem elektrických odporů a reaktancí. Následující kapitoly obsahují hlavní obsah práce, a to popis a odvození kružnicového diagramu a algoritmus pro jeho vykreslení. Na základě zjištěných poznatků a odvození jsem následně naprogramoval softwarovou aplikaci, jejíž popis je v samostatné kapitole. Program je uložen na CD, které je přílohou této práce.

1.1 Elektrická oblouková pec obecně

Elektrická oblouková pec (dále zkratkou EOP, v angličtině electric arc furnace EAF) patří do skupiny elektrických pecí v oboru elektrometalurgie. Do stejné skupiny patří i pece indukční a odporové, největší procento tavení však probíhá v EOP (přes 90% [1,2]). Tavení v EOP je v metalurgii jedním z nejčastějších způsobů výroby oceli, řadí se tedy do primární metalurgie, toto postavení můžeme jednoduše demonstrovat na obrázku (1).

Jedná se o moderní, ekonomický, a dnes nejčastěji používaný proces tavení přímo redukovaného železa a kovového šrotu. Hlavním materiálovým vstupem pro EOP je šrot, podíl jeho obsahu představuje 80-100% vsázky. Jen v některých případech je šrot nahrazován houbovitým nebo přímo redukovaným železem. Výstupem z pece je surová ocel. Mimo oceli pec produkuje také strusku, emise pevných částic a znečištěný plyn. Celkové množství oceli vyrobené v EOP stále roste a předpokládá se, že tyto pece pravděpodobně nahradí klasické vysoké pece, a to z důvodu poměrně malé velikosti oproti celé aglomeraci vysokých pecí, a zejména také kvůli ekonomice provozu.

V roce 1998 byly náklady na výrobu tuny oceli v EOP v USA vyčísleny na 140–200\$, oproti tomu výroba tuny oceli ve vysoké peci stála přibližně 1000\$ [3]. Náklady byly tedy více než čtyřnásobně menší. V dnešní době se přibližně 40% (v USA a Kanadě přes 45%) z celkového množství vyprodukované oceli vyrábí v EOP, v České republice ale dlouhodobý průměr činí pouhých 7–10% z celkové výroby 7mil. tun ročně [1]. Oproti tomu například v Německu již v roce 1995 bylo vyrobeno pomocí elektrometalurgie přes 24,1% z roční výroby 10 milionů tun oceli [2]. EOP patří mezi největší odběratele elektrické energie, výkony jejich pecních transformátorů jsou v rozmezí 20 až 200MW. Pro představu Ostrava, bez započítání spotřeby podniku Arcelor Mittal Ostrava (ta svou spotřebu převážně pokryje vlastní výrobou), spotřebuje ročně cca 1,636 miliardy kilowatthodin elektrické energie [4], a pokud toto číslo podělíme číslem 8766 (roční počet hodin), dostaneme průměrný roční příkon elektrické energie 183,63MW.



Obrázek 1 - Způsoby výroby oceli a postavení EOP[5]

1.2 Historie EOP

První pec založenou na elektrickém oblouku patentoval mezi roky 1879 a 1881 Wilhelm Siemens. První pec dnes nejběžněji používané konstrukce vytvořil v roce 1899 Paul Héroult, dle něj se EOP tohoto typu nazývají Héroultovy pece. V Evropě, především v Německu, byla zahájena stavba EOP v roce 1905 a první ocel v nich byla vytavena 17.2.1906. Největší rozmach tato technologie ale přišel v USA, kde uvedli do provozu první pec pro vsázku 15t dne 26.5.1909. Na našem území byla zahájena tavba v EOP za první světové války, přesněji v roce 1917 v Kladně. Jmenovitý obsah vsázky této pece byl tři tuny, výkon pecního transformátoru 950kVA, a jejím dodavatelem italský Fiat. V těchto dobách byla výroba elektrooceli ještě poměrně drahá oproti v té době standardním Siemens-Martinským pecím. Postupným zvyšováním výkonu a intenzifikací o dmýchání kyslíku a chemikálií výrobní náklady na výrobu oceli v EOP podstatně klesly. V padesátých letech 20. století začaly vznikat tzv. vysokovýkonné pece UHP (ultra high productivity), SUHP (super ultra high productivity) a UHCP (ultra high chemical power). [6]

1.3 Základní rozdělení EOP

EOP se dělí na dvě skupiny dle napájení oblouku střídavým nebo stejnosměrným proudem, dále dle konstrukce a působností oblouku.

1. Oblouk napájený střídavým proudem
 - a. S přímo působícím obloukem
 - i. Obloukové pece s nevodivou nístějí¹
 - ii. Obloukové pece s vodivou nístějí
 - b. S nepřímo působícím obloukem
2. Oblouk napájený stejnosměrným proudem
 - a. S půdní elektrodou nebo elektrodami
 - b. Obloukové pece s nevodivou nístějí

Z typů, vyjmenovaných v tomto dělení, největším vývojem prošly EOP s napájením oblouku střídavým proudem a nevodivou nístějí. Ty také v současnosti mají ve výrobě oceli naprostou převahu.

Užití každého z typů EOP má své pro i proti. Nevýhodou nevodivé nístěje je nestejnorodý ohřev taveniny a nerovnoměrnosti v zatížení fází. Tato nerovnoměrnost totiž způsobuje deformaci vektorů napájecího napětí a proudu. Nevýhodou pecí s vodivou nístějí je oproti tomu nižší výrobnost a snadnější protavení nístěje. O poměru výhod, nevýhod a účinnosti stejnosměrných a střídavých typů pecí se stále diskutuje. U stejnosměrných EOP je za pecní transformátor umístěn navíc tyristorový šestipulzní usměrňovač v můstkovém zapojení a ve stejnosměrné části je umístěna tlumivka, která omezuje namáhání tyristorů. Výhodou stejnosměrných pecí je výrazné snížení spotřeby grafitových elektrod (až 50%) a omezení rušivých vlivů na napájecí síť pece. Naopak jejich nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady [3].

Dělit EOP s nevodivou nístějí je možné také podle výkonu pece, respektive výkonnosti jejího transformátoru. Tyto pece rozdělujeme dle [1] na

- **RP** pece – běžné výrobnosti (Regular Productivity)
- **HP** pece – vysoké výrobnosti (High Productivity)
- **UHP** pece – velmi vysoké výrobnosti (Ultra High Productivity)
- **SUHP** pece – extrémně vysoké výrobnosti (Super Ultra High Productivity)
- **UHCP** pece – velmi vysoké výrobnosti s vysokou vkládanou chemickou energií (Ultra High Chemical Power)

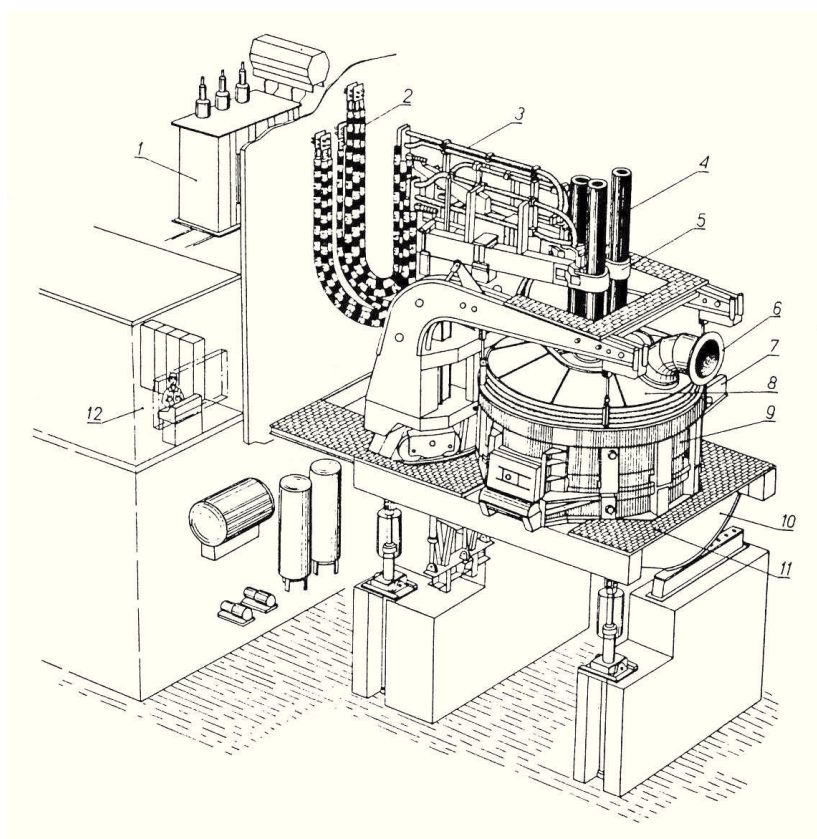
Tabulka 1 - Rozdělení pecí dle výkonu na tunu vsázky[1]

	do 35t	40-90t	> 100t	
RP pece	200-350	150-300	150-250	kW/t
UHP pece	450-550	400-500	300-400	kW/t
SUHP pece	600-700	550-600	500-550	kW/t

¹ POZNÁMKA: nístěj je vana hutní pece, ve které probíhá tavení železa.

2 Popis základní konstrukce EOP

Základní konstrukce EOP je zobrazena na obrázku (2). Pec se skládá z pecní vany (nístěje) (č.9), vyzděné žáruvzdornou vyzdívkou. Její dno má tvar zaoblené misky, u některých pecí je dno a plášť pece rozebíratelné kvůli možnosti snadné výměny. Na nístěji je umístěno víko (č.8), které je tvořeno žáruvzdornými cihlami zaklenutými do ocelového kruhu víka. Víko je také zpravidla chlazené vodou. Také na něm je odtaž spalín (č.6), které vznikají při tavbě (až 20kg/t). Odsávání spalín může být vyvedeno jak z víka, tak celé konstrukce pece, popřípadě z prostoru nad pecí. Odpadní teplo ze spalín a chlazení může být dále využito při vytápění průmyslového závodu. Nístěj má válcovitý nebo kuželovitý tvar. Uložena je na kolébkách (č.11) s kolejnicemi, na kterých se může za pomoci elektromechanického nebo hydraulického pohonu naklápět. Pomocí zmiňovaných typů pohonu lze pohybovat i s vozíky držáků elektrod. Spojení pece a elektrické sítě je provedeno tak, aby umožňovalo pracovní úkony, tj. naklápění celé pece na odpichovou stranu při odpichu nebo k pracovním dvířkům při stahování strusky a sázení feroslitin. Sekundárními svorkami transformátoru (č.1) začíná tzv. krátká cesta EOP. Tu tvoří ohebné kabely chlazené vodou (č.2), horizontální trubkové vodiče (č.3), pohyblivé držáky elektrod (č.5) a samotné elektrody (č.4). Na celou technologii EOP samozřejmě dohlíží řídicí stanoviště (č.12). Technologické zařízení musí být spolehlivé a odolávat vysoké prašnosti a teplotnímu namáhání provozem.

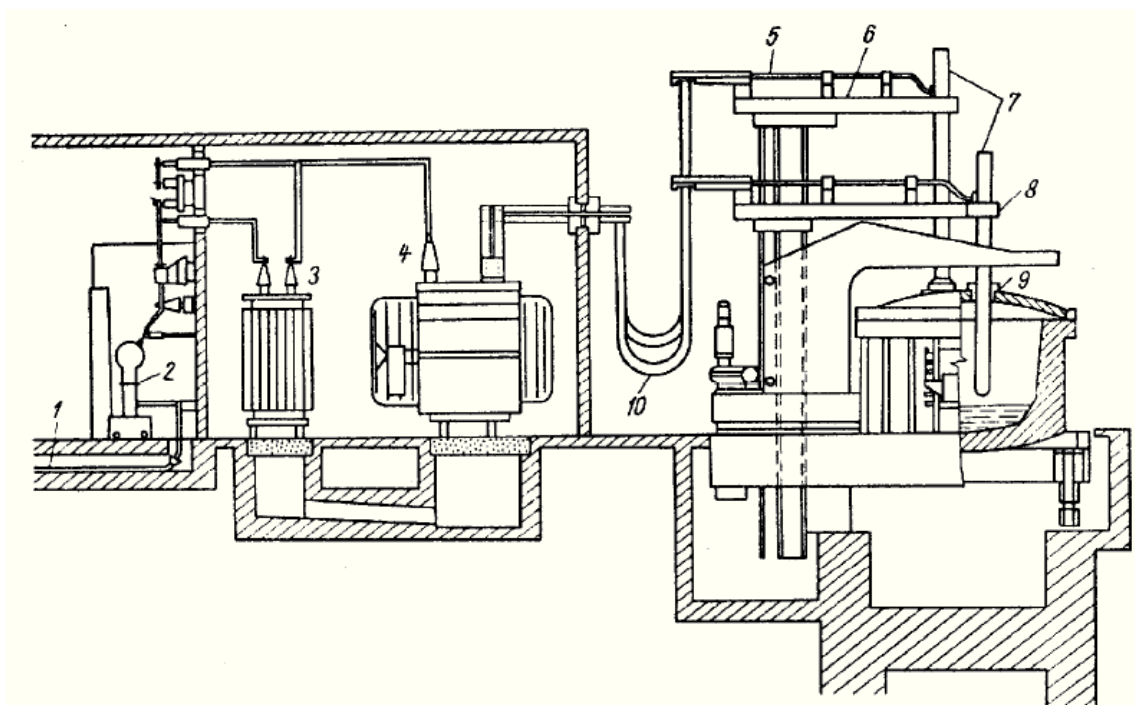


Obrázek 2 - Třífázová elektrická oblouková pec [7]

3 Elektrické zařízení EOP

Elektrické zařízení EOP má přímý vliv na výrobnost pece, a tím i ekonomiku provozu. Zařízení musí být spolehlivé, stejně jako mechanické zařízení musí často odolávat vysoké prašnosti a teplotnímu namáhání provozem. Jakákoliv porucha totiž snižuje výrobnost a zhoršuje jakost vyrobené oceli. Elektrické zařízení obloukové pece se skládá (číslování je dle obrázku (3)): z hlavního přívodu (č.1), odpojovače a hlavního vypínače (č.2), tlumivky (č.3), transformátoru (č.4), ohebných lan (č.10), trubkových vodičů nebo pásoviny (č.5), ramen (č.6) s držáky elektrod (č.8) a elektrod samotných (č.7). Číslo (č.9) na obrázku (3) popisuje část víka, které se nazývá delta střecha. V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé zmiňované části EOP a představeny výpočty pro stanovení pracovní charakteristiky elektrické části EOP, jako je kruhový diagram elektrické obloukové pece (v anglofonním prostředí známé jako power diagram electric arc furnace).

Regulace obvodu a řízení výkonu tavení se u nových moderních pecí provádí již automaticky pomocí průmyslových počítačů. Softwary těchto počítačů užívané pro tavbu vychází také z matematických odvození z kružnicového diagramu. Regulace výkonu a účinnosti tavení se pak provádí zvedáním nebo spouštěním elektrod při hoření oblouku (mění se odpor oblouku) a také přepínáním napěťových stupňů.



Obrázek 3 - elektrické zařízení obloukové pece [8]

3.1 Hlavní vypínač a odpojovač

Hlavní vypínač je nejvíce namáhaným přístrojem elektrického obvodu. Spíná a rozpojuje silový obvod na konci tavby, během tavby, pokud dojde k delšímu styku elektrody s taveninou, při nebezpečných přetíženích transformátoru a samozřejmě při haváriích. Četnost vypínání je 60–70krát za den. Nejčastěji používaným typem vypínače jsou v současné době tlakovzdušné vakuové SF₆ vypínače. [7]

Odpojovač slouží k odpojení celého elektrického obvodu EOP od vysokého napětí při opravách nebo revizích zařízení a na chod pece nemá žádný vliv.



Obrázek 4 - Hlavní vypínač EOP

3.2 Tlumivka

Tlumivky (omezující reaktory) pro EOP jsou zvláštním typem tlumivek. Mají několik funkcí současně. Omezují (vyrovnávají) prudké změny zkratových proudů tak, aby byl v rozmezí jeho 1,8 až dvojnásobku jmenovitého proudu. Zkraty vznikají zejména v první fázi tavení, tj. natavování vsázky, a to při častém dotyku elektrod s taveninou. Svou reaktancí ovlivňují pracovní body elektrické části EOP. Tlumivky EOP musí být v celé pracovní oblasti lineární a odolávat opakovaným proudovým rázům. Konstrukčně se jedná většinou o vzduchem chlazené typy tlumivek. Pro velké výkony se používají tlumivky v olejovém provedení. Tlumivka může mít několik přepínatelných stupňů reaktance (vyvedením vinutí) a po natavení vsázky pece se vyřazuje z obvodu (většinou při přepínání vinutí transformátoru). [9]

Vyrábí se v celé škále výkonů, k největším na světě patří zařízení pro obloukovou pec 250 tun, instalované v ocelárně Gebze/Kocaeli v Turecku, kde jeden cyklus tavby trvá 45 minut. Pro napájení této pece je určen transformátor 265MVA a reaktor 77,5Mvar.

K dosažení požadovaných optimálních hodnot reaktance je u menších pecí (o zdánlivém výkonu transformátoru menším než 5 MVA) nutné doplňovat obvod tlumivkami s odbočkami umožňujícími snížení reaktance v průběhu tavení a práci při optimálních hodnotách $\cos\varphi$. [11]

Pro výpočet reaktance tlumivky je potřeba stanovit rázovou reaktanci tlumivky $x_{\%}$ (procentní úbytek napětí na tlumivce při průchodu jmenovitého proudu) a její kompenzační výkon S_{TL} . Ve výpočtu se počítá s jmenovitým napětím tlumivky U_n (primárním napětí pecního transformátoru).

$$X_{TL} = x_{\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_{TL}} \quad (\Omega) \quad (1)$$

Pro použití hodnoty reaktance tlumivky ve výpočtu v sekundárním obvodu pece je nutné přepočítat reaktanci na sekundární stranu.

$$X_{TL} = X'_{TL} \cdot \left(\frac{U_{0(n)}}{U_{1n}} \right)^2 (\Omega) \quad (2)$$

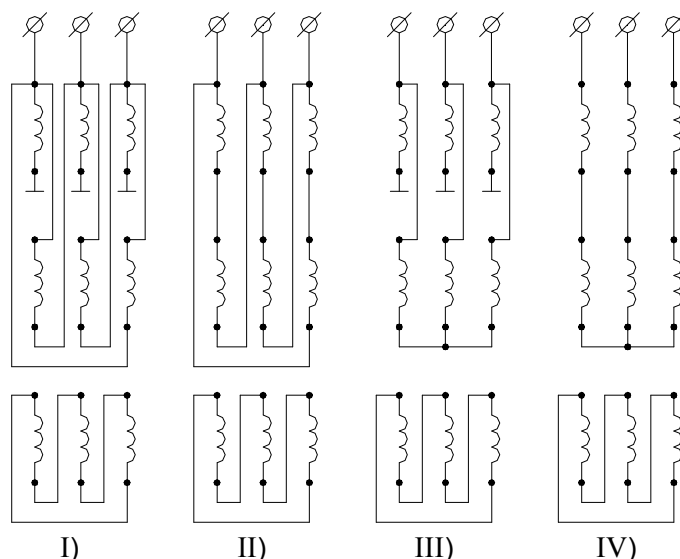
3.3 Pecní transformátor

Pecní transformátory jsou takové transformátory, které přímo napájí krátkou cestu EOP. Dodávají velký proud v širokém rozsahu napětí a výkony od 20MVA do 200MVA. Sekundární proudy přesahující 100kA jsou běžné. Pecní transformátory jsou speciálně dimenzovány na velké proudové výkyvy, které by u klasických transformátorů vedly k přehřátí. Elektrické oblouky jsou totiž nestabilními zátěžemi a elektrody jsou často zkratovány pohybem šrotu při natavování. Zkraty jsou také jednou z příčin značného mechanického namáhání vinutí transformátorů magnetickými silami. V primárním obvodu je namáhána také izolace při přepínání napětových stupňů, což vede k napětovým špičkám.



Obrázek 5 - Pecní transformátor 42MVA

Pecní transformátory jsou vždy trojfázové, sekundární vinutí mají zapojena do trojúhelníku, v tomto zapojení nepropouští vyšší harmonické (zapojení do trojúhelníku není vždy provedeno na svorkách transformátoru, více v kapitole Krátké cesty). Primární vinutí může být zapojeno do hvězdy, trojúhelníku nebo lomené hvězdy. Přepínáním těchto jednotlivých zapojení a přepínáním počtu závitů na primárním vinutí lze měnit velikost sekundárního napětí. Přepínání počtu závitů na primární straně se provádí bez odpojení obvodu od elektrického proudu. Napájení se vypíná pouze při přepínání hvězda-trojúhelník, a to proto, aby se zabránilo velkému proudovému nárazu, na který by nestačila ani tlumivka nebo odpory.



Obrázek 6 - zapojení vinutí pecního transformátoru

Na obrázku (6) je příklad základního čtyřstupňového zapojení pecního transformátoru. První stupeň dává nejvyšší sekundární napětí, čtvrtý potom nejnižší. [6]

- **Stupeň I:** přepínač hvězda-trojúhelník je v poloze trojúhelník, zapojena je však pouze část primárního vinutí.
- **Stupeň II:** přepínač je v poloze trojúhelník, přepínač odboček zařazuje do obvodu celé primární vinutí.
- **Stupeň III:** přepínač je v poloze hvězda, přepínač odboček zařazuje do obvodu pouze část primárního vinutí.
- **Stupeň IV:** přepínač je v poloze hvězda, přepínač odboček zařazuje do obvodu celé primární vinutí.

Při konstrukci elektrické části pece je důležité stanovit správně rozsah sekundárního napětí, protože oblouk mezi elektrodami a vsázkou je při vyšším napětí delší. Při natavování je delší oblouk výhodný, protože se urychlí natavení vsázky, oblouk je přitom kryt vsázkou, takže nepůsobí nepříznivě na vyzdívku. Při redukci (natavování) je nutno přepnout na nejnižší sekundární napětí, avšak oblouk musí zůstat dostatečně dlouhý, aby se vyzdívka nenauhličovala.[6] Velikost sekundárního napětí je v rozmezí od 180V u malých pecí až po 1,6kV u velkých pecí. Stanovení optimálního výkonu pecního transformátoru má úzkou souvislost s procesem intenzifikace výroby elektroocel v EOP. Stanovení výkonu tedy nezáleží už jen na hmotnosti a složení vsázky (pouze u RP pecí), ale za objektivnější jsou považovány postupy snažící se stanovit optimální dimenzi transformátoru komplexním posouzením vlivu tohoto činitele na ekonomiku provozu.

Pro výpočet pracovních bodů EOP je potřeba u transformátoru stanovit ztráty naprázdno P_{knT} , sekundární napětí transformátoru $U_{0(n)}$ (obvod se řeší pro sekundární stranu), napětí transformátoru nakrátko u_k a zdánlivý výkon S_T . Impedance transformátoru je dána tímto vztahem:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{0(n)}^2}{S_T} (\Omega) \quad (3)$$

Napětí nakrátko je složená z činné a reaktanční složky:

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2} \quad (-) \quad (4)$$

Činnou složku napětí nakrátko je možné vypočítat z činných ztrát nakrátko:

$$u_r = \frac{P_{knT}}{S_T} \quad (-) \quad (5)$$

Činný odpor transformátoru je pak možné vyjádřit takto:

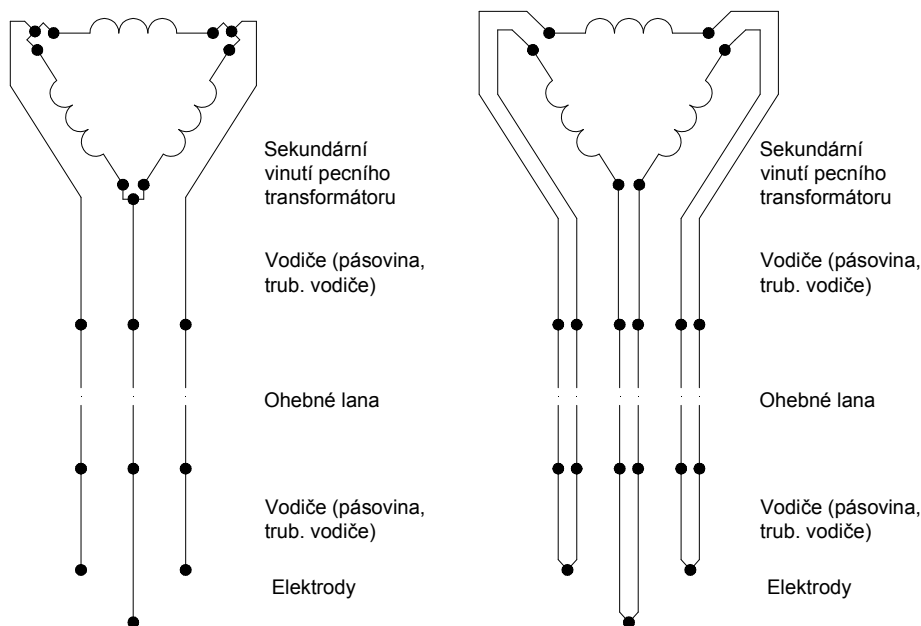
$$R_T = u_r \cdot \frac{U_{0(n)}^2}{S_T} \quad (\Omega) \quad (6)$$

Výsledná reaktance transformátoru (dvojvinutového) je potom:

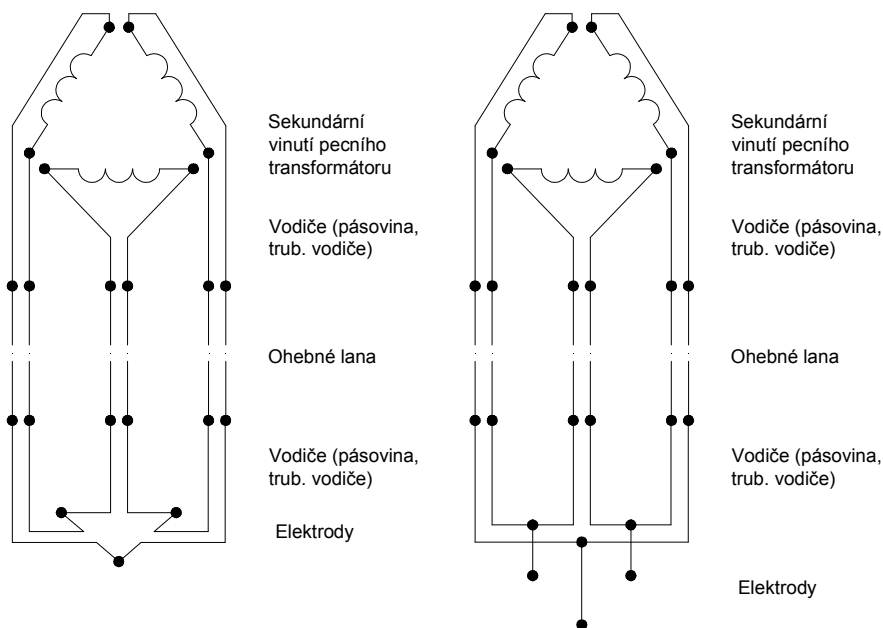
$$X_T = u_x \cdot \frac{U_{0(n)}^2}{S_T} \quad (\Omega) \quad (7)$$

3.4 Krátká síť

Krátkou sítí se nazývá elektrické vedení mezi výstupy na sekundární straně transformátoru a elektrodami. Zahrnuje pásové části, ohebné lana, vodiče na ramenech držáků elektrod a elektrody. Jak již bylo poznamenáno, z transformačních poměrů a výkonu pecního transformátoru vznikají i proudy v řádu stovek kiloampér. Vzhledem k takto vysokému proudu musí být krátká síť tvořena několika vodiči (pásky) a měla by být co nekratší, protože zde dochází k značným Joulovým (tepelným) ztrátám, od toho je také nazývána „krátkou sítí“. Průchod velkého proudu vytváří kromě tepelných ztrát kolem obvodu krátké sítě také silné střídavé elektromagnetické pole. U vodičů běžně používaného rovinného uspořádání je toto pole značně nehomogenní. Nehomogenita je navíc zesilována ocelovou konstrukcí pece a haly ocelárny. Nestejnorodost magnetického pole se vyznačuje rozdíly reaktancí jednotlivých fází, přenosem energie mezi fázemi, a tím vznikem tzv. ostré nebo mrtvé fáze, což vede k většímu opotřebení elektrod a vyzdívky pece. Tento jev lze omezit vhodným zapojením a uspořádáním vodičů pro vyrovnání indukčnosti. Nejjednodušší uspořádání je do rovnostranného trojúhelníku. Variant zapojení vodičů krátké cesty je několik, ve značné míře se využívá bifilárního uspořádání (dva vodiče v blízkosti, kdy proudy obou vodičů tečou opačným směrem). Konstrukčně složitější zapojení krátké cesty je většinou doprovázeno chlazením vodou kvůli zmenšení průřezu, což má vliv na menší mechanické namáhání. Velikost procházejícího proudu lze ovlivnit místem spojení sekundárního vinutí transformátoru do trojúhelníku, příklady zapojení jsou na obrázcích (7) a (8). Výsledná reaktance se vypočítá z vlastní a vzájemné indukčnosti jednotlivých vodičů.



Obrázek 7 - Schéma zapojení krátké cesty (vlevo bez využití bifilárního zapojení)



Obrázek 8 - Schéma zapojení krátké cesty s využitím bifilárního zapojení

Důležitou součástí jsou také držáky elektrod, kde vznikající ztráty dosahující 2 až 6% příkonu pece. Na velikost těchto přechodových odporů má vliv řada činitelů, k nimž patří druh materiálu kontaktní plochy čelistí s elektrodou. Ramena i držáky elektrod jsou vyrobeny z nemagnetických materiálů. Toto opatření je nutné z důvodu vzniku hysterzních ztrát ve feromagnetických materiálech při průchodu velkého proudu. Vlivem poměrně vysoké permeability těchto materiálů se také zvyšuje indukční odpor krátké sítě.

Elektrody obloukových pecí jsou posledním důležitým článkem krátké sítě. V elektrodách se ztrácí okolo 10% elektrické energie, proto se klade velký důraz na jejich jakost a nízký odpor při vysokých teplotách. Elektrody musí být zhotoveny z materiálů, které se při vysokých teplotách netaví,

mají malou teplotní roztažnost, mohou přenášet velké proudy a neobsahují přísady znečišťující tavbu. Vysoké požadavky na materiál elektrod splňuje uhlík, který se netaví ani při teplotě elektrického oblouku, pouze pomalu oxiduje. Podle způsobu výroby dělíme elektrody na uhlíkové a grafitové, uhlíkové se používají někdy u malých obloukových pecí pro výrobu uhlíkové oceli běžné jakosti, grafitové mají přibližně pětikrát menší měrný odpor než uhlíkové, jejich oxidace začíná při vyšších teplotách, obsah popela je nižší.[6]



Obrázek 9 - Elektrody EOP

Tabulka 2 - Fyzikální vlastnosti uhlíkových a grafitových elektrod [6]

Fyzikální vlastnosti	Uhlíková elektroda	Grafitová elektroda
Skutečná hustota ($g \cdot cm^{-3}$)	1,8 až 2	2,2 až 2,3
Zdánlivá hustota ($g \cdot cm^{-3}$)	1,45 až 1,6	1,55 až 1,7
Pevnost v ohybu (MPa)	300	6 až 24
Pevnost v tlaku (MPa)	30	20 až 35
Měrný odpor ($\Omega \cdot mm^{-2} \cdot m$)	40 až 65	6 až 13
Teplota počátku oxidace (°C)	400	600
Pórovitost (%)	20 až 25	23 až 30
Obsah popela (%)	5 až 7	pod 0,5

3.4.1 Výpočet a konstrukční provedení krátké sítě

Detailní výpočet krátké sítě je poměrně složitý především z hlediska stanovení indukčních odporů a různých druhů vodičů při jejich různém uspořádání. Výpočet krátké sítě lze rozdělit na dvě části, a to výpočet činných a indukčních odporů. Při výpočtu je třeba učinit předpoklad některých zjednodušujících podmínek:

- a) Střídavé elektrické proudy, které protékají krátkou sítí, mají sinusový průběh
- b) Délka elektrod je konstantní
- c) Vliv feromagnetických těles v okolí krátké sítě je konstantní
- d) Pohyb ohebných lan vůči sobě je minimální



Obrázek 10 -Trubkové vodiče EOP

3.4.2 Výpočet činných odporů

Celkový činný odpor krátké sítě je dán sumou činných odporů všech jejích částí, tj. pásovin, ohebných lan, trubkových vodičů na ramenech elektrod a elektrod. Odpory jednotlivých částí nelze však počítat přímo podle Ohmová zákona, i když se jedná o ryze ohmické odpory. Průchodem velkého proudu ve vodičích velkého průřezu vzniká tzv. povrchový jev (skinefekt), neboli vytlačování elektrického proudu vlivem vlastní indukce vodiče z vnitřku k jeho povrchu, což má za následek nerovnoměrné zatěžování průřezu vodiče. Při předběžných výpočtech se zjednodušeně uvažuje, že tento vodič je dutý a že má tloušťku stěny rovnající se proudovému průniku, přičemž musí být učiněn předpoklad, že tímto průřezem protéká všechnen proud, do určité míry rovnoměrně

rozdělený. Při detailních výpočtech pak násobíme činný elektrický odpor daného vodiče koeficientem povrchového jevu „skinefekt“, který je dán rozměry a tvarem vodiče.

Výpočet stejnosměrného odporu vodičů konstantního průřezu, vychází ze známého vztahu

$$R_S = \rho_{20} \cdot \frac{l}{S} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (8)$$

kde

l - je délka vodiče (m)

S - průřez vodiče (mm²)

ρ_{20} - měrný elektrický odpor vodivého materiálu při 20°C (Ω · mm² · m⁻¹)

α - teplotní součinitel materiálu

$\Delta\vartheta$ - teplotní rozdíl ve °C nebo °K

V případě uvažování povrchového se násobí stejnosměrný odpor koeficientem povrchového jevu.

$$R = k \cdot R_S = k_s \cdot k_b \cdot R_S \quad (\Omega) \quad (9)$$

Součinitel k zachycuje vliv povrchového jevu k_s , popřípadě i jevu blízkosti k_b . Pro stejnosměrný proud tento jev nevzniká. Pro střídavý obecně platí, že je větší než jedna. Povrchový jev je závislý především na frekvenci, průřezu vodiče a permeabilitě materiálu. Vliv povrchového jevu se výrazněji uplatňuje, je-li polovina jednoho z rozměrů vodiče větší nebo se alespoň blíží hloubce vniku δ . Pro měď to je přibližně 11mm, pro hliník 14mm.

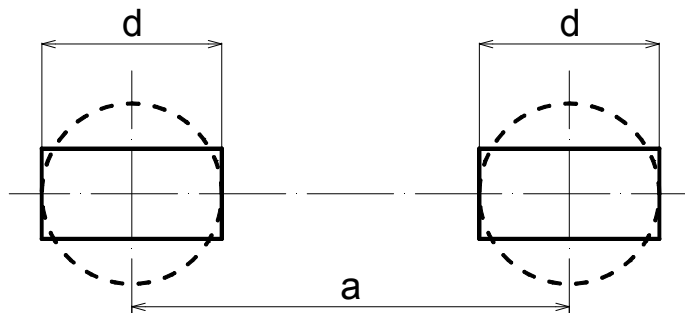
$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

ω - je úhlová rychlost proudu

ρ - měrný elektrický odpor vodivého materiálu (Ω · mm⁻² · m)

μ - absolutní magnetická permeabilita materiálu vodiče

Jev blízkosti ovlivní velikost odporu teprve tehdy, jeli vzdálenost středů dvou rovnoběžných vodičů menší než přibližně pětinašobek rozměru průřezu vodiče v rovině os vodičů. Velikost koeficientu je vždy větší než 1, uplatní se ale méně než skinefekt.



Obrázek 11 - Velikost vodičů uspořádaných v rovině

Další ohmickou složkou, která se musí započítat do činné složky odporu, jsou kontaktní odpory. Ty jsou závislé především na tlaku, ploše a opracování kontaktních ploch. Například kontaktní odpor šroubovaného spoje počítá podle vztahu:

$$R_{\text{kon}} = \frac{C}{n \cdot \sqrt{F}} (\Omega) \quad (11)$$

kde C je součinitel dle druhu materiálu, drsnosti povrchu a teploty kontaktu. [11]

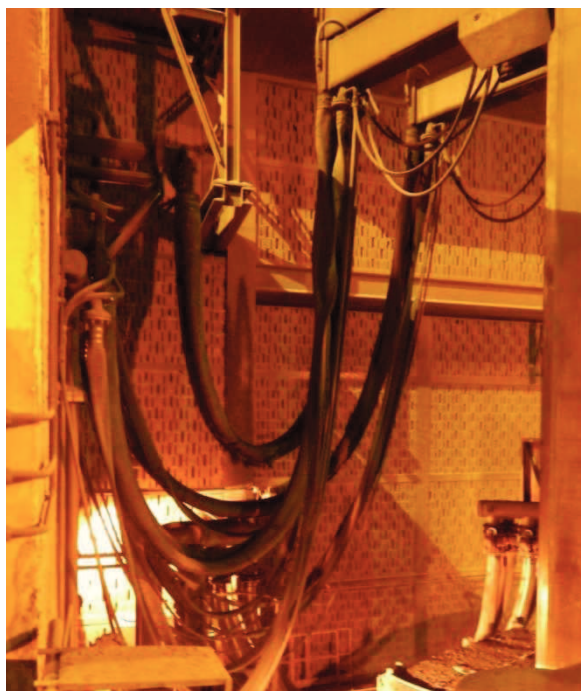
Tabulka 3 - Hodnoty součinitele C pro výpočet kontaktních odporů [11]

Měď – měď, čisté, neokysličené plochy	$0,8 - 1,4 \cdot 10^{-4}$
Měď – měď, plochy čištěné kyselinou	$0,9 - 1,1 \cdot 10^{-4}$
Hliník – měď	$10 \cdot 10^{-4}$
Ocel – měď	$30 \cdot 10^{-4}$
Ocel – ocel	$75 - 80 \cdot 10^{-4}$

n – počet šroubů (ks)

F – síla odvozená jedním šroubem (kg)

Doporučovaný tlak pro dokonalý kontakt je 600 kg/cm^2 .



Obrázek 12 - Ohebné lana EOP

3.4.3 Výpočet induktivních odporů[11]

Stanovit přesně induktivní odpory lze pouze měřením krátké sítě, jelikož se zde projevují vlivy okolního prostředí a uspořádání vedení. Jedná-li se o trojfázovou bifilární krátkou síť, je nejvýhodnější vypočítat koeficienty vzájemné indukčnosti M samostatně pro každou ze šesti fází.

$$L_1 = L_{11} - M_{21} - \frac{M_{31}}{2} + \frac{M_{41}}{2} - \frac{M_{51}}{2} + \frac{M_{61}}{2} = L_{11} - M_{21} \text{ (H)} \quad (12)$$

První číslice v indexu značí číslo vodiče, z něhož elektromagnetické pole vzájemné indukčnosti vychází, druhá číslice v indexu značí číslo vodiče, v němž se indukuje elektromotorická síla (napětí). V případě výpočtu, kdy vodiče nejsou v bifilárním provedení a jsou tvořeny třemi vodiči, platí vztah (13).

$$L_1 = L_1 - \frac{M_{21}}{2} - \frac{M_{31}}{2} \text{ (H)} \quad (13)$$

Indukčnosti jednotlivých fází však nejsou stejné. Proto je potřeba stanovit si střední indukčnost fází, jako aritmetický průměr.

$$L_f = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \text{ (H)} \quad (14)$$

Indukčnost vyvolaná pouze vlastním tokem vodiče se vypočítá dle vztahu (15).

$$L = 2 \cdot l \cdot \left(2,3 \cdot \log \frac{2 \cdot l}{r} - 1 \right) \cdot 10^{-9} \text{ (H)} \quad (15)$$

Rovnice (15) platí pouze za předpokladu, že je ekvivalentní rádius r daleko menší než 1. Ekvivalentní rádius se zadává v centimetrech, stejně tak i délka vodiče l . Pro plný kruhový průřez plného kruhového vodiče je dán vztahem:

$$r = 0,799 \cdot R \text{ (cm)} \quad (16)$$

kde R je skutečný poloměr vodiče. Pro dutý kruhový vodič platí vztah:

$$r = \frac{a_1 + a_2}{2} \text{ (cm)} \quad (17)$$

kde

a_1 - vnitřní poloměr dutého kruhového vodiče (cm)

a_2 - je vnější poloměr dutého kruhového vodiče (cm).

Hodnota ekvivalentního poloměru pro vodič pravoúhlého průřezu se stranami a a b se stanoví dle vztahu

$$r = m \cdot (a + b) \text{ (cm)} \quad (18)$$

kde se koeficient m mění dle poměru velikosti $\frac{a}{b}$ a graficky se odečítá z příslušných tabulek, lze však počítat s průměrnou hodnotou 0,2235.

Koeficient vzájemné indukčnosti dvou paralelních vodičů se stanoví dle vztahu

$$M = 2 \cdot \left[l \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d} - \sqrt{l^2 + d^2} + d \right] \cdot 40^{-9} \text{ (H)} \quad (19)$$

kde

l - délka vodiče (cm)

d - vzdálenost mezi geometrickými osami vodičů (cm)

Po stanovení celkové výsledné indukčnosti jedné fáze L_f lze vypočítat indukční odpor této fáze dle známého vztahu:

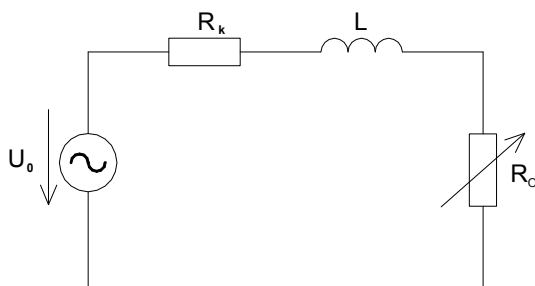
$$X_f = \omega \cdot L_f = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_f (\Omega) \quad (20)$$

4 Kruhový diagram EOP

Jednotlivé obloukové pece se od sebe liší různými elektrickými parametry, za ně lze považovat především parametry pecního transformátorů a parametry krátké sítě. K stanovení vhodných parametrů pece, které zajistí, aby účinnost pece nebyla příliš nízká, je nutno sestrojit diagramy pracovních elektrických charakteristik. Tyto diagramy se musí sestrojit pro každý stupeň sekundárního napětí pecního transformátoru. Výchozím podkladem pro pracovní elektrické charakteristiky je *kruhový diagram*, jehož vytvoření závisí na konstrukci elektrické části EOP. Při sestrojení kruhového diagramu se vychází z několika zjednodušujících podmínek a náhradního schématu.

Podmínky pro sestrojení kruhového diagramu jsou následující:

- Napětí na vstupu pecního transformátoru je konstantní a má sinusový charakter.
- Kruhový diagram se vypracovává jen pro jednu fázi.
- Při návrhu uspořádání a volby elektrického zapojení je třeba dbát na eliminaci jevu ostré a mrtvé fáze.
- Vychází se ze sumy činných a induktivních odporů pece.
- Hodnoty všech odporů jsou stejné i při prudkých změnách proudů



Obrázek 13 – Náhradní elektrické schéma krátké sítě

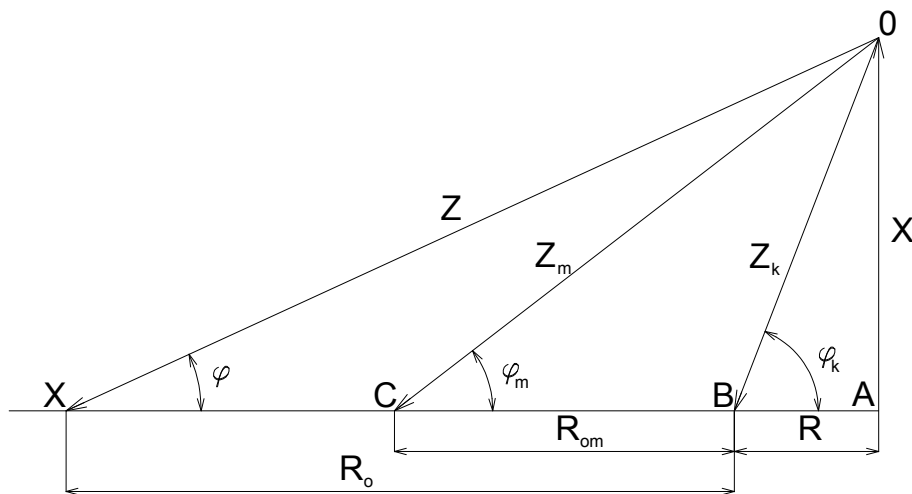
V náhradním elektrickém schématu jedné fáze EOP představuje U_0 sdružené napětí sekundární strany pecního transformátoru, R_k je suma všech vypočtených, popřípadě změřených činných odporů krátké cesty (včetně transformátoru, popř. tlumivky) přepočtené na sekundární stranu, L je celková suma všech indukčností, případně reaktance X_k , jenž je součinem indukce L a úhlové rychlosti ω .

$$X_k = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \text{ (}\Omega\text{)} \quad (21)$$

Rezistor R_o představuje odpor oblouku, který se mění od nuly do nekonečna dle natažení oblouku, které se provádí zdvihem elektrod. Hodnoty R_k a L lze považovat za konstantní. Regulace obvodu je tedy možná pouze zdvihem a spouštěním elektrod, popřípadě změnou napětí U_0 . Napětí však nelze rychle přepínat, proto se většinou provádí jen při změně údobí tavby, jak bylo popsáno v kapitole o pecním transformátoru.

Proud obvodu je závislý na celkové impedanci obvodu Z , jejíž velikost se rovná přeponě v pravoúhlém trojúhelníku mezi vektory odporu R a reaktance X_k , jak je znázorněno na obrázku (14).

$$Z = (R_k + R_O) + j(\omega \cdot L) = \sqrt{(R_k + R_O)^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (\Omega) \quad (22)$$



Obrázek 14 - Vektorový diagram impedance [7]

Z takto vyjádřené impedance lze stanovit i účinník pece pro každý libovolný pracovní bod.

$$\cos \varphi = \frac{R_k + R_O}{\sqrt{(R_k + R_O)^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (-) \quad (23)$$

Pokud se elektrody dotýkají vsázky, tak, že R_O je roven nule, pro účinník nakrátko platí

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (-) \quad (24)$$

Proud oblouku je nepřímo úměrný proměnlivé hodnotě impedance, lze tedy snadno vyjádřit z Ohmova zákona, že

$$I = \frac{U_0}{Z} = \frac{U_0}{(R_k + R_O) + j(\omega \cdot L)} \quad (A) \quad (25)$$

Pro stanovení kruhového diagramu je nutné rozdělit vztah na reálnou část a imaginární y vynásobením vztahu komplexně sdruženým číslem.

$$I = \frac{U}{(R_k + R_O) + j(\omega \cdot L)} \cdot \frac{(R_k + R_O) - j(\omega \cdot L)}{(R_k + R_O) - j(\omega \cdot L)} \quad (A) \quad (26)$$

$$I = \frac{U \cdot ((R_k + R_O) - j(\omega \cdot L))}{(R_k + R_O)^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (A) \quad (27)$$

$$I = \frac{U \cdot (R_k + R_O)}{(R_k + R_O)^2 + (\omega \cdot L)^2} - j \frac{U \cdot \omega \cdot L}{(R_k + R_O)^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (A) \quad (28)$$

Po úpravě jsou reálná část x a imaginární y rovny:

$$x = \frac{U \cdot (R_k + R_0)}{(R_k + R_0)^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (29)$$

$$y = \frac{U \cdot \omega \cdot L}{(R_k + R_0)^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (30)$$

V rovnicích x a y je proměnlivým parametrem dle předcházejících podmínek pouze hodnota odporu oblouku R_0 . Pro rovnici křivky se R_0 vyjádří z poměru x a y .

$$\frac{x}{y} = \frac{R_k + R_0}{-\omega \cdot L} \quad (31)$$

$$R_0 = -\omega \cdot L \cdot \frac{x}{y} - R_k \quad (32)$$

Dosazením takto vyjádřeného R_0 do rovnice y lze vyjádřit rovnici kružnice.

$$y = \frac{-U \cdot \omega \cdot L}{\left(R_k - \omega \cdot L \cdot \frac{x}{y} - R_k\right)^2 + (\omega \cdot L)^2} = \frac{-U \cdot \omega \cdot L}{\omega^2 \cdot L^2 \cdot \frac{x^2}{y^2} + \omega^2 \cdot L^2} \quad (33)$$

$$y = \frac{-U}{\omega \cdot L \cdot \frac{x^2 + y^2}{y^2}} \quad (34)$$

$$\omega \cdot L \cdot \left(\frac{x^2 + y^2}{y^2}\right) = -\frac{U}{y} \quad (35)$$

$$\omega \cdot L \cdot y^2 \left(\frac{x^2 + y^2}{y^2}\right) = -U \cdot y \quad (36)$$

$$\omega \cdot L \cdot (x^2 + y^2) = -U \cdot y \quad (37)$$

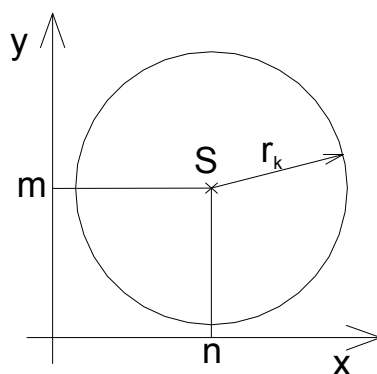
$$(x^2 + y^2) = -\frac{U \cdot y}{\omega \cdot L} \quad (38)$$

$$x^2 + y^2 + \frac{U}{\omega \cdot L} \cdot y = 0 \quad (39)$$

Rovnice kružnice v obecném tvaru je vyjádřena jako

$$(x - m)^2 + (y - n)^2 - r_k^2 = 0 \quad (40)$$

Přičemž m a n jsou souřadnicemi středu kružnice a r_k jejím poloměrem.



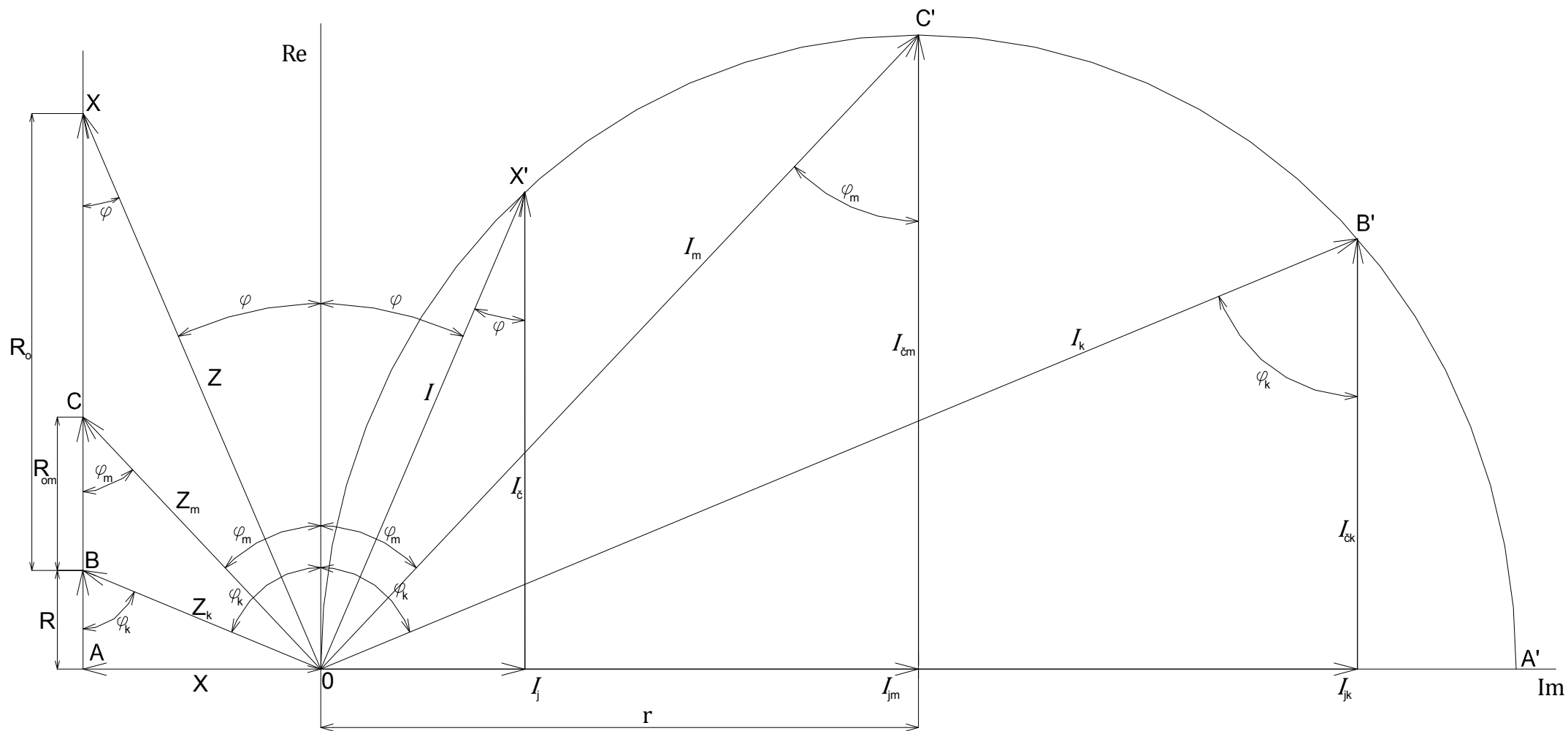
Obrázek 15 - Kružnice

Z těchto odvození a rovnic vyplývá, že koncový bod fázoru proudu I se bude pohybovat po kružnici se středem

$$m = 0 ; n = \frac{U}{2 \cdot \omega \cdot L} \quad (41)$$

a poloměrem

$$r_k = \frac{U}{2 \cdot \omega \cdot L} \quad (42)$$



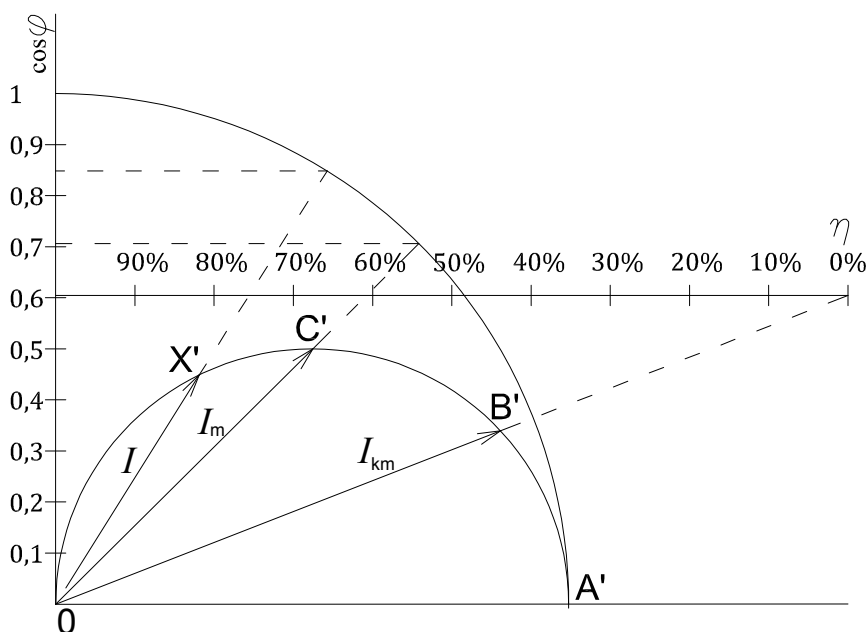
Obrázek 16 - Kruhový diagram

Tato kružnice (po které se bod pohybuje) je inverzní k vektorovému diagramu impedance (obrázek 16) v měřítku U_0 krát větším. Jednotlivé body s apostrofem jsou obrazy bodů vektorového diagramu impedance. Proud I_{km} , který je znázorněn úsečkou OB' , je proud obvodu při styku elektrod s taveninou. Zde má pec nejnížší účinnost, jelikož v tomto pracovním bodě má obvod nejnížší účinník $\cos\varphi$ (dochází k velkému fázovému posunu mezi napětím a proudem). Pro vytažení oblouku je však tento styk nutný. Proud I_m odpovídá úsečce OC' , tedy pracovnímu bodu při maximálním elektrickém výkonu pece. Při maximálním výkonu se však nepracuje s nejvyšší elektrickou účinností EOP. Ta se zvyšuje, posouvá-li se pracovní bod po kružnici od bodu C' k bodu X' a dále až k bodu O , tedy zvyšováním účinníku (snižováním jalové složky proudu). Zvyšováním účinníku $\cos\varphi$ je však nepříznivě ovlivněna stabilita elektrického oblouku, proto nelze jalovou složku kompenzovat nebo zvyšovat délku oblouku až do účinníku $\cos\varphi=0,95$.

Na kruhovém diagramu se rozlišují tři základní pracovní oblasti EOP:

- Oblast nestabilního chodu – úsek OX' – dlouhý oblouk
- Oblast optimálního chodu – úsek $X'C'$
- Oblast stabilního chodu – úsek $C'B'$ – krátký oblouk

Účinnost lze graficky znázornit jako průsečík prodloužených vektorů proudů a úsečky účinnosti. Tu lze zkonstruovat v případě konstrukce kolmice k ose y , která protíná vektor proudu I_{km} , který je libovolně prodloužený tak, aby byl graf čitelný. Průsečík kolmice s vektorem proudu I_{km} potom odpovídá 0% účinnosti. Účinník je pak průsečíkem prodlouženého vektoru proudu a kružnice, jejíž poloměr je roven průměru kruhového diagramu. Na svislou osu se pak vynese měřítko účinníku, viz obrázek (17).



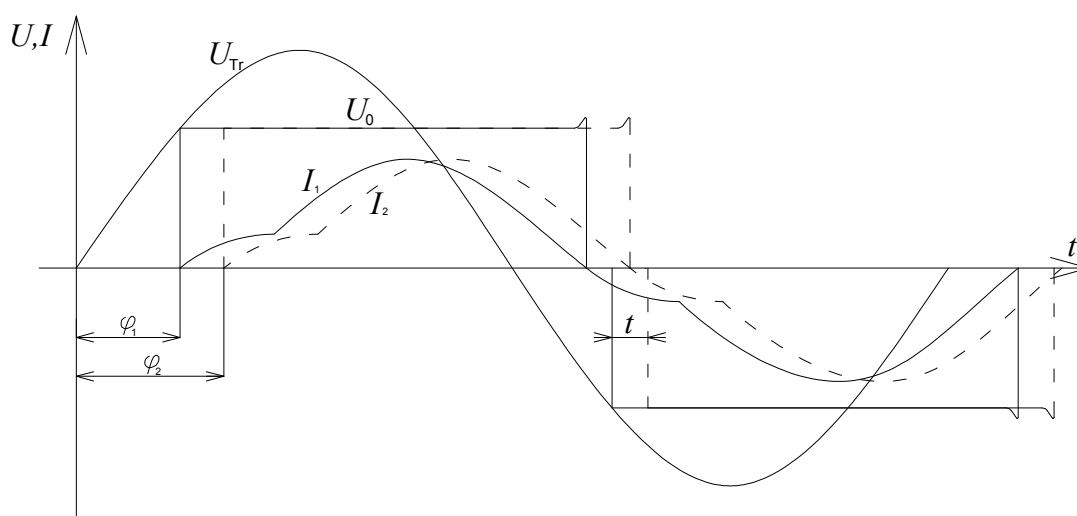
Obrázek 17 - Kruhový diagram, účinnost a účinník pece

4.1 Podmínka hoření oblouku

Při použití střídavého proudu pro napájení oblouku existuje v rámci jedné periody časový úsek t , během něhož proud obvodem neprochází (a oblouk nehoří), není-li v obvodu sériově zařazena dostatečná indukční reaktance X_k . Zvyšováním indukční reaktance X_k se zkracuje časový úsek t , kdy oblouk nehoří, až na nulovou hodnotu. Výpočtem lze dokázat, že elektrický oblouk bude stále dobře hořet, bude-li obvod pracovat s nejvyšším účinníkem $\cos\varphi = 0,85$. Reaktance X_k však snižuje průměrný činný výkon vnášený do pracovního prostoru pece, snižuje účinník, a pec tak pracuje s nižší účinností, jelikož odebírá i neužitečný jalový proud. Pro konkrétní parametry jako je velikost pece, její konstrukční provedení, charakter odpadu a fáze tavby existuje vždy optimální hodnota X_k obvodu pece.

U obloukových pecí nastává kromě změny proudu i změna elektrody. Jestliže v první půlperiodě tvoří katodu uhlíková elektroda, pak v druhé půlperiodě přebírá tuto úlohu tavený materiál. V případě kdy katodu tvoří tavený materiál, dochází k tomu, že se katodová skvrna na začátku tavby rychle ochlazuje z důvodu dobré tepelné vodivosti kovu.

Výsledkem je pak to, že v čase, kdy katodu tvoří elektroda, protéká obvodem menší proud. Napětí na oblouku je obdélníkové. To je charakteristické pro oblouky s velmi vysokými proudy, kde prakticky již nedochází ke změně napětí v závislosti na proudu [7].



Obrázek 18 - Střídavý proud oblouku v obvodu s indukčností [7]

4.2 Maximální výkon pece a oblouku

Maximální užitečný příkon EOP je závislý na činném odporu obvodu R_k , proměnlivém odporu R_0 a také na indukční reaktanci obvodu X_k . Odpor oblouku R_0 je hodnota neznámá a obtížně spočitatelná, pro maximální příkon pece se tedy hledá úhel φ_{Pmax} , kdy je činný příkon maximální, tj. na vrcholu kružnice kruhového diagramu. Všechny uvedené hodnoty jsou počítány pouze pro jednu fázi symetrické EOP. Ve skutečnosti jsou mezi sebou jednotlivé fáze ovlivňovány.

4.2.1 Maximální výkon pece

Pro odvození se vychází z výkonu na oblouku P_0 , který je dán jeho odporem a procházejícím proudem.

$$P_0 = R_0 \cdot I^2 = R_0 \cdot \left(\frac{U_f}{Z}\right)^2 \quad (W) \quad (43)$$

Odpor oblouku R_0 lze vyjádřit z vektorového diagramu impedance takto:

$$\operatorname{tg} \varphi_{P_{\max}} = \frac{\omega \cdot L}{R_k + R_0} \quad (-) \quad (44)$$

$$R_0 = \frac{\omega \cdot L}{\operatorname{tg} \varphi} - R \quad (\Omega) \quad (45)$$

Stejně tak vyjádříme velikost impedance, tak aby vztah neobsahoval odpor oblouku R_0 , jako

$$Z = \frac{\omega \cdot L}{\sin \varphi_{P_{\max}}} \quad (\Omega) \quad (46)$$

Dosazením do rovnice (43) dostaneme

$$P_0 = \frac{U_f^2}{\omega \cdot L} \cdot \sin \varphi_{P_{\max}} \cdot \cos \varphi_{P_{\max}} - \frac{U_f^2 \cdot R}{(\omega \cdot L)^2} \cdot \sin^2 \varphi_{P_{\max}} \quad (W) \quad (47)$$

První část vztahu představuje příkon do obvodu, lze jej upravit dle goniometrických funkcí na tvar

$$P_{P_{\max}} = \frac{U_f^2}{2 \cdot \omega \cdot L} \cdot \sin 2 \varphi_{P_{\max}} \quad (W) \quad (48)$$

Proměnou hodnotou příkonu P je pouze funkce $\sin 2 \varphi$, která dosahuje maxima v případě, že

$$\sin 2 \varphi_{P_{\max}} = 1 \quad (-) \quad (49)$$

tj. v případě, že $\varphi_{P_{\max}} = 45^\circ$, což je případ, kdy celkový činný odpor obvodu se rovná indukční reaktanci obvodu (50), hodnota účinníku obvodu bude $\cos \varphi_{P_{\max}} = 0,707$.

$$X_L = R_0 + R_k \quad (\Omega) \quad (50)$$

Maximální výkon pece $P_{P_{\max}}$ pro jednu fázi v případě $\sin 2 \varphi_{P_{\max}} = 1$ je závislý pouze na napájecím napětí a indukční reaktanci. Zvýšit výkon pece při konstantním napětí lze tedy pouze změnou reaktance. Tuto hodnotu nelze zvětšovat do hranice účinníku pro stabilní hoření oblouku, který byly popsány výše.

$$P_{P_{\max}} = \frac{U_f^2}{2 \cdot \omega \cdot L} = \frac{U_f^2}{2 \cdot X_L} \quad (W) \quad (51)$$

4.2.2 Maximální výkon na oblouku

Pro maximální výkon na oblouku P_0 lze spočítat úhel $\varphi_{0\max}$ z podmínky pro maximum funkce, tedy její derivací položenou nule.

$$\frac{dP_0}{d\varphi_{0\max}} = 0 \quad (52)$$

$$\frac{dP_0}{d\varphi_{0\max}} = \frac{U_f^2}{\omega \cdot L} (\cos^2 \varphi_{0\max} - \sin^2 \varphi_{0\max}) - \frac{2 \cdot U_f^2 \cdot R}{(\omega \cdot L)^2} \sin \varphi_{0\max} \cdot \cos \varphi_{0\max} \quad (53)$$

Po úpravě

$$\frac{dP_0}{d\varphi} = \frac{U_f^2}{\omega \cdot L} \left(\cos 2\varphi_{0\max} - \frac{R}{\omega \cdot L} \sin 2\varphi_{0\max} \right) \quad (54)$$

Pro splnění podmínky, aby se derivace rovnala nule, musí být závorka rovna nule, lze tedy odvodit

$$\cos 2\varphi_{0\max} - \frac{R}{\omega \cdot L} \sin 2\varphi_{0\max} = 0 \quad (55)$$

$$\cos 2\varphi_{0\max} = \frac{R}{\omega \cdot L} \sin 2\varphi_{0\max} \quad (56)$$

Převedením na funkci $\operatorname{tg} \varphi$ je zřejmé, že úhel fázového posunu pro maximální výkon na oblouku $\varphi_{0\max}$ bude polovinou úhlu fázového posunu při zkratu elektrod s taveninou φ_k , dle vektorového diagramu impedance.

$$\operatorname{tg} 2\varphi_{0\max} = \frac{R}{\omega \cdot L} = \operatorname{tg} \varphi_k \quad (57)$$

$$\varphi_{0\max} = \frac{1}{2} \varphi_k \quad (58)$$

Tato skutečnost odpovídá stavu, kdy se velikost odporu oblouku R_0 rovná zkratové impedanci Z_k .

$$R_0 = Z_k (\Omega) \quad (59)$$

Z těchto vyjádření a goniometrických pravidel pro poloviční úhel bude účinník EOP při maximálním výkonu roven

$$\cos \varphi_{0\max} = \cos \frac{\varphi_k}{2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{R}{Z_k}} (-) \quad (60)$$

Vyjádřením $\sin 2\varphi_{0\max}$ pro maximální výkon na oblouku z vektorového diagramu impedance a jeho dosazením do vztahu pro maximální výkon $P_{0\max}$ na oblouku lze získat výraz, ve kterém první člen představuje celkový výkon obvodu při maximálním výkonu na oblouku $P_{P0\max}$ a druhá část vyjadřuje ztráty v obvodu ΔP_{ztrat} .

$$\sin 2\varphi_{0\max} = \frac{\omega \cdot L}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (-) \quad (61)$$

$$P_{0\max} = \frac{U_f^2}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} - \frac{R}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \cdot \frac{U_f^2}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} + R} \quad (62)$$

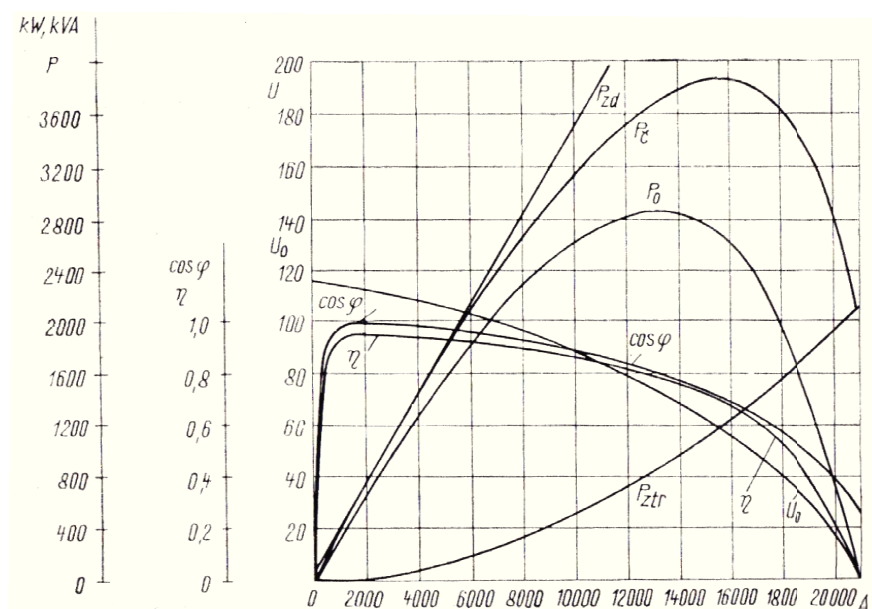
$$\Delta P_{\text{ztrat}} = R \cdot I_{\max}^2 = \frac{R}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \cdot \frac{U_f^2}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} + R} \quad (\text{W}) \quad (63)$$

$$P_{\text{P0max}} = \frac{U_f^2}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (\text{W}) \quad (64)$$

5 Elektrické pracovní charakteristiky

Obloukové pece mohou pracovat v širokém rozmezí elektrických parametrů, přičemž jen určité technicko-ekonomické parametry vyhovují pracovnímu režimu s vysokou účinností. Pro stanovení vhodných elektrických parametrů je nejlepším způsobem sestrojení grafických diagramů závislosti těchto parametrů. Tyto diagramy, jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, se nazývají pracovními charakteristikami obloukové pece. Sestrojují se pro každou odbočku sekundárního napětí pecního transformátoru a jejich konstrukce vychází z kruhového diagramu nebo přesnějšího měření. Nevýhodou těchto diagramů je potřeba velkého množství dat či měření, protože je nelze vykreslit stejně jednoduše jako kružnicový diagram.

Z diagramu elektrických pracovních charakteristik je zřejmé, jak ukazuje i obrázek (19), že celkový činný výkon P_{Σ} roste při vzrůstu proudu, dokud nedosáhne hodnoty, kdy účinník klesne za hodnotu 0,707 (ověření odvozeného účinníku). V případě, že elektrody se přibližují k tavenému materiálu, zvyšuje se proud až do chvíle, kdy se elektrody dotknou vsázky. Pec pracuje v tomto případě s nejnižším účinníkem, celkový činný výkon P_{Σ} se rovná elektrickým ztrátám P_{ztr} , a tedy i účinnost η je nulová. [11]



Obrázek 19 - Pracovní charakteristiky EOP[11]

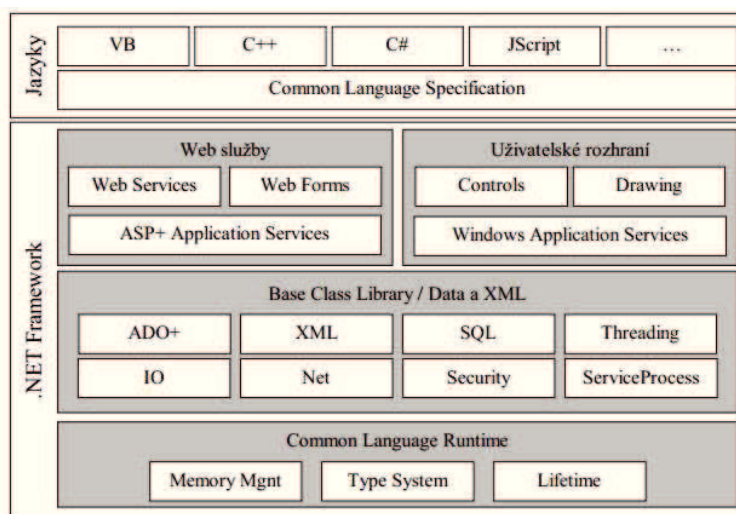
Mimo uvedené veličiny na obrázku (19) je dále možno posuzovat také opotřebení vyzdívky. Pro toto opotřebení se stanovují koeficienty opotřebení vyzdívky, které charakterizují osálávání vyzdívky pece. Koeficienty jsou pouze relativní veličinou, protože neurčují skutečné množství tepla vyzařovaného na stěnu, ale stanovují pouze přibližné poměry mezi výkonem oblouku a vzdáleností elektrického oblouku od nejbližšího bodu stěny. Jedním z koeficientů je „Schwabeho koeficient“ který je uveden ve vztahu (65).

$$R_F = \frac{U_{0(n)} \cdot P_0}{a_0^2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (65)$$

Dalším příkladem koeficientu opotřebení vyzdívky je koeficient N.V. Okorokova, který je obdobný jako „Schwabeho“ s tím rozdílem, že v čitateli se počítá s výkonem jedné fáze pecního transformátoru.

6 Výběr programovacího prostředí

Poté, co jsme si představili problematiku vykreslení a pochopení kružnicového diagramu, je pro tvorbu programu potřeba zvolit vhodný programovací jazyk. Program má pracovat na operačním systému Windows firmy Microsoft s vhodným grafickým rozhraním pro obsluhu. Architektura operačních systémů Windows dnes nabízí uživatelům možnosti spouštění aplikací naprogramovaných pomocí „vyšších“ programovacích jazyků platformy Microsoft .NET Framework. Struktura zmiňované platformy je tvořena několika vrstvami, ty obsahují systémové prostředky a knihovny, které využívají kompilátory jednotlivých podporovaných programovacích jazyků. Jedná se o programovací jazyky C, C++, C#, Visual Basic a Java.



Obrázek 20 - Struktura .NET Framework [13]

Program vytvořený na platformě .NET Framework může být webovou aplikací nebo klientskou konzolovou aplikací.

Výhodou webové aplikace, je, že program může využít zobrazovací prostředí již nainstalované v každém operačním systému Windows, tím je webový prohlížeč Internet Explorer. Takto vytvořená aplikace pak může běžet na centrálním webovém serveru a jednotliví uživatelé do ní mohou vstupovat pomocí síťového připojení. V případě aktualizace se aktualizuje pouze jeden centrální program a odpadá tak potřeba s různými verzemi, kompatibilitou a operačním výkonem na různých pracovních stanicích.

Na druhou stranu .NET Framework obsahuje sadu tříd nazvanou formuláře Windows (známější je anglické označení Windows forms), které byly navrženy pro místní klientské konzolové aplikace. Ty oproti webovým aplikacím mají výhodu v tom, že fungují i offline, tedy bez síťového připojení k centrálnímu webovému serveru, proto mají snadnější přístup k datovému úložišti a paměti počítače na kterém běží.

Jazyky podporované platformou .NET Framework lze rozdělit na strukturované a objektově orientované.

Strukturované programovací jazyky používají programovací techniku, kde se implementovaný algoritmus rozděluje na dílčí úlohy (funkce, bloky příkazů), které se spojují v jeden celek. K implementaci programu se používá jen vybraných řídicích struktur, ostatní struktury nejsou

povoleny vůbec, nebo jejich použití v programech je velice výjimečné (např. GOTO). Typickým představitelem strukturovaného programovacího jazyku je C. [12]

Objektově orientované programovací jazyky, respektive kód v nich napsaný, je složen z tzv. objektů. Programování v nich spočívá v modelování určité části. Jednotlivé prvky modelované reality jsou jednotlivými objekty kódu, ve kterém se seskupují do tzv. entit. Objekty si pamatují svůj stav a navenek poskytují operace. Každý objekt pracuje jako černá skříňka, která dokáže provádět jí určené činnosti a komunikovat s okolím, aniž by vyžadovala znalost způsobu, kterým vnitřně pracuje. Jednotlivé objekty spolu komunikují pomocí rozhraní. Typickými představiteli jsou programovací jazyky C# nebo Java. [12]

Jelikož programovací jazyk C# (v angličtině C sharp) je objektově orientovaný jazyk vyvinutý přímo společností Microsoft, a dostává se mu proto velké podpory ze strany jeho domovské společnosti, rozhodl jsem se pro tvorbu svého programu použít právě jej. Za vývojové prostředí jsem si zvolil Microsoft Visual Studio 2010. Program pro vytvoření kružnicového diagramu jsem vytvořil jako klientskou aplikaci pomocí sady tříd Windows forms.

Microsoft Visual Studio je vývojové prostředí vyvinuté přímo společností Microsoft a využívá se jak pro vývoj konzolových, tak i webových aplikací. Microsoft Visual Studio obsahuje editor kódu, který využívá funkce jako jsou informace o parametrech jednotlivých tříd a členů, generuje seznamy členů programu, nabízí dokončování slov apod.. Obecným termínem pro tyto funkce je „IntelliSense“. Microsoft Visual Studio samozřejmě obsahuje i kompilátor kódu („debugger“). Další aplikací popisovaného vývojového prostředí je designér formulářů Windows Forms. Toto vývojové prostředí podporuje všechny jazyky a služby, které podporuje platforma .NET Framework.

8 Koncepce programu a jeho popis

8.1 Algoritmus vykreslení kružnicového diagramu

Tato kapitola je zaměřená na popis algoritmu pro vykreslení kružnicového diagramu (v následujícím textu označováno též jako „graf“) pro zadané napětěvé odbočky. Algoritmus je následně použit pro vytvoření programu vykreslujícího kruhový diagram. Algoritmus vychází z odvození a zakládá se na vztazích uvedených v předchozích kapitolách. Graf je vykreslován na výkonových osách, kde činný výkon P je osou y a jalový výkon Q představuje osu x .

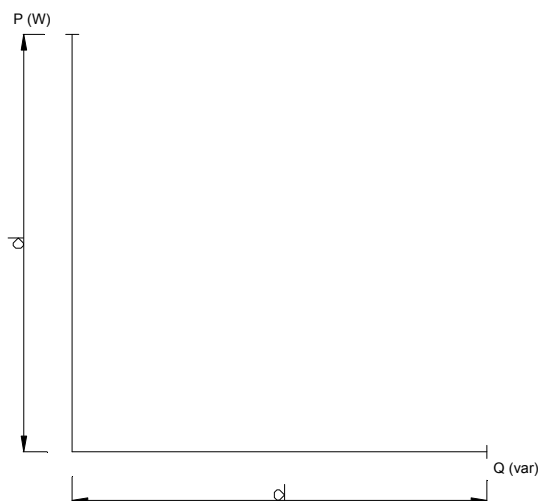
Vstupními hodnotami pro vykreslení kružnicového diagramu jsou činný odpor krátké cesty R_k , reaktance krátké cesty X_k a sdružené napětí jednotlivých odboček pecního transformátoru $U_{0(n)}$ (n označuje stupeň napětěvé odbočky). Napětěvých odboček může být vždy různý počet. Kružnicový diagram je vykreslován na výkonových osách, do tohoto algoritmu je tedy začleněno i vykreslování zatížení transformátoru, proto je nutné přidat k vstupním parametrům i hodnotu zdánlivého výkonu pecního transformátoru S_T . Zadání S_T je nezbytné, jeho hodnota se totiž využívá pro výpočet pracovních bodů.

Velikost kružnicového diagramu je dána požadovaným rozměrem grafu d , který je vždy stejný, tak aby mohl být zobrazen na vykreslovanou plochu grafu. Měřítko se pak mění dle maximálního zkratového proudu I_{km} obvodu. Tento proud je však pouze teoretický, při jeho výpočtu se uvažuje pouze s reaktancí krátké cesty X_k . Společně s nejvyšším napětím ze zadaných napětěvých odboček U_{0max} stanovují poloměr největší kružnice.

$$I_{km} = \frac{U_{0max}}{\sqrt{3} \cdot X_k} \text{ (A)} \quad (66)$$

Měřítko kružnicového diagramu se pak vykresluje tak, jak bylo uvedeno výše, a to dle požadovaných rozměrů kružnicového diagramu d ve vykreslovací oblasti. Jednotky v následujících vztazích jsou uváděny v milimetrech, které v programu odpovídají pixelům. Jednotka grafu je W/mm pro osu y a var/mm pro osu x , měřítko pro obě osy výkonu je stejné.

$$meritkoPQ = \frac{U_{0max} \cdot I_{km}}{\sqrt{3} \cdot d} \text{ (W(var)/mm)} \quad (67)$$



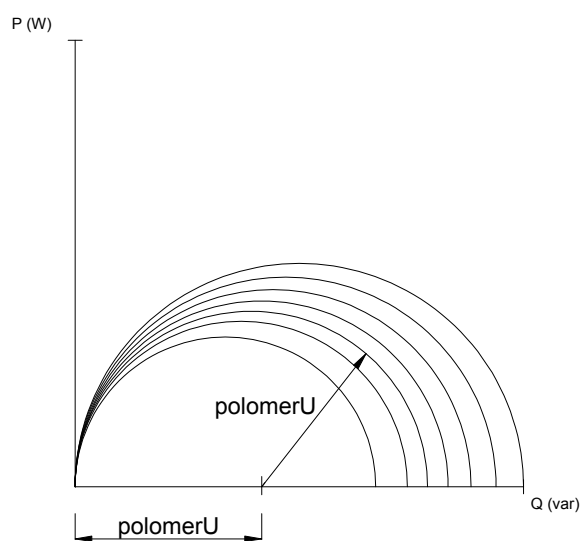
Obrázek 21 - Vykreslení os kružnicového diagramu

V kružnicovém diagramu je potřeba vykreslit jednotlivé požadované napěťové kružnice. Pro výpočet poloměrů těchto kružnic je opět nutné spočítat maximální zkratové proudy I_{km} pro dané napěťové stupně $U_{0(n)}$, vypočítat měřítko proudu a následně poloměr pro jednotlivé napěťové kružnice, které jsou omezeny osou x . Rovnice (70) využívá výše odvozeného vztahu (42).

$$I_{km(n)} = \frac{U_{0(n)}}{\sqrt{3} \cdot X_k} \text{ (A)} \quad (68)$$

$$meritkoIU_{0(n)} = \frac{\sqrt{3} \cdot meritkoPQ}{U_{0(n)}} \text{ (A/mm)} \quad (69)$$

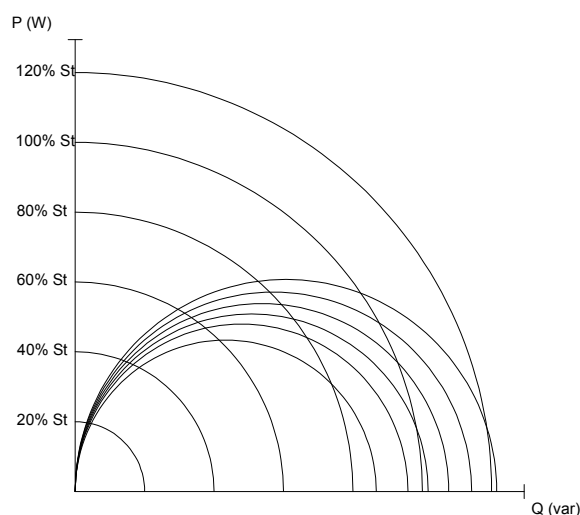
$$polomerU_{0(n)} = \frac{I_{k(n)}}{2 \cdot meritkoIU_{0(n)}} \text{ (mm)} \quad (70)$$



Obrázek 22 - Vykreslení napěťových kružnic

Následně je praktické vykreslit a zobrazit výkonové kružnice pecního transformátoru. Po vykreslení pracovních bodů bude zřejmé, jak je pecní transformátor zatěžován. V tomto algoritmu je defaultně vykresleno zatížení transformátoru vždy pro šest kružnic, a to pro zatížení 20%, 40%, 60%, 80%, 100% a 120%. Větší zatížení se totiž nepředpokládá. Jednotlivé kružnice mají střed v bodě [0;0], tj. v průsečíku osy x a y , jelikož zdánlivý výkon S je vektorem složek činného a jalového výkonu. Velikost poloměru je tedy pouze přepočtením hodnoty zdánlivého výkonu dle daného měřítka. Koeficient c ve vztahu (71) slouží pro označení procentuálního násobku, například pro kružnice zatížení 20% bude $c = 0,2$, v případě 120% bude $c = 1,2$ apod. Zvyšováním výkonu pecního transformátoru se budou kružnice zvětšovat a v případě, že výkon bude větší než průměr nejvyšší napěťové odbočky, nemusí se některé kružnice do grafu vejít.

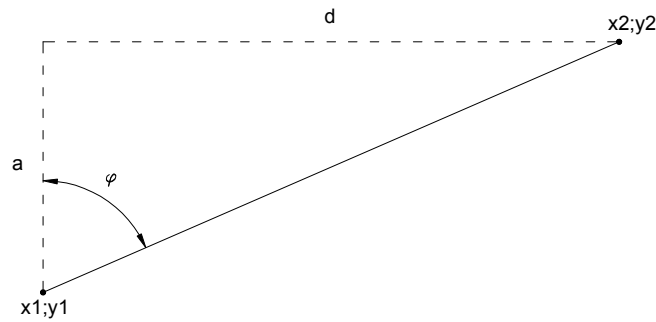
$$polomerS_T = \frac{c \cdot S_T}{meritkoPQ} \text{ (mm)} \quad (71)$$



Obrázek 23 - Vykreslení kružnic zatížení pecního transformátoru

Nadále je v kružnicovém diagramu potřeba zobrazit hodnoty účinníku $\cos\varphi$. Toto zobrazení je možné pomocí přímek účinníku. Přímka je v tomto případě devět, pro hodnoty účinníku $\cos\varphi = 0,1$ až $0,9$. Zvláště jsou navíc zobrazeny přímky účinníku pro odvozený maximální výkon obvodu pece φ_{Pmax} a maximální výkon na oblouku φ_{0max} . Účinník pro maximální výkon pece a oblouku se však v praxi mohou měnit, a to z důvodu přenosu energie mezi fázemi [7]. Tyto všechny účinníky mají hodnotu kosinu úhlů mezi osou činného výkonu a přímkami účinníku. Algoritmus většiny programovacích jazyků, stejně tak i jazyk C#, potřebuje pro obecné vykreslování přímek dva body, mezi kterými bude tato přímka vykreslena. Souřadnicemi těchto bodů jsou $[x1;y1]$ a $[x2;y2]$ a začátek všech přímek účinníku je v bodě $[x1=0;y1=0]$. Jejich délky omezuje pouze vykreslovací oblast. Souřadnice $x2$ bude vždy délkou grafu d , a to tak, aby přímka zasahovala přes celý graf, tedy

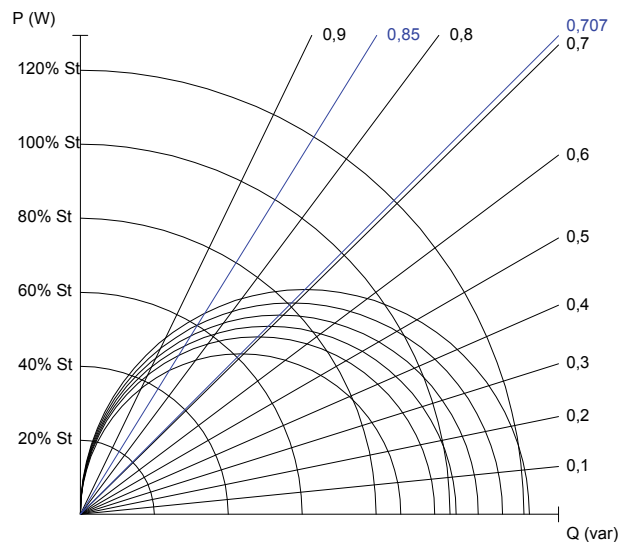
$$x2 = x1 + d \text{ (mm)} \quad (72)$$



Obrázek 24 - Grafické odvození polohy bodů pro přímky účinku

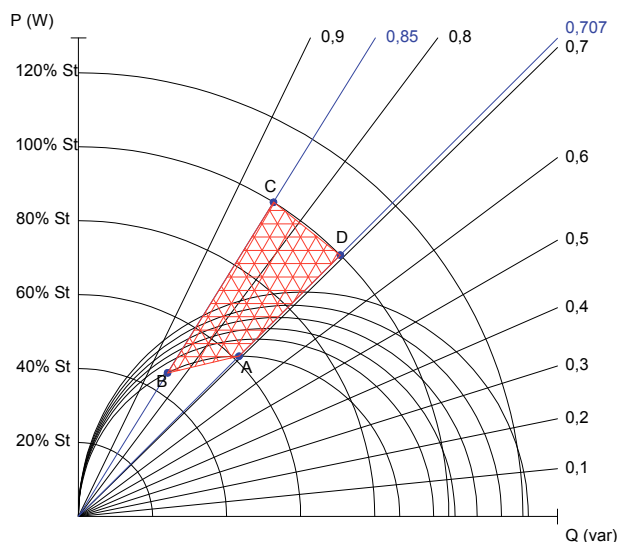
V případě bodu y2 je potřeba vypočítat souřadnici pomocí goniometrie, jelikož známe délku d a také cosinus úhlu φ ($\cos\varphi = 0,1$ až $0,9$). Délka úsečky a na obrázku například pro $\cos\varphi = 0,1$ dle vztahu (73) bude rovna

$$a = \operatorname{tg}(\arccos(0,1)) \cdot d(\text{mm}) \quad (73)$$



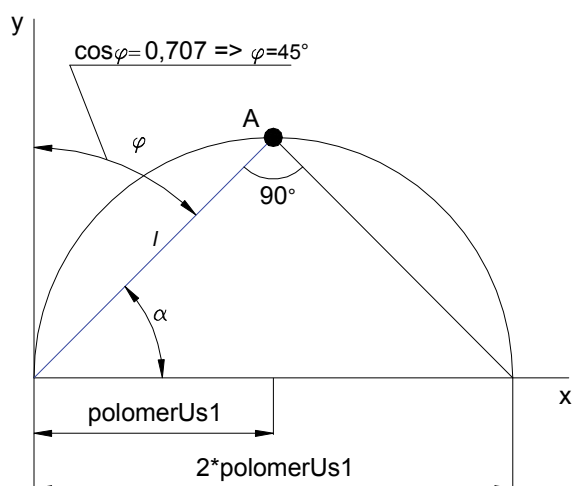
Obrázek 25 - Vykreslení přímek účinku

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, mezi hodnotami účinku $\cos\varphi_{\text{Pmax}} = 0,707$ a $\cos\varphi_{0\text{max}} = 0,85$ se nachází tzv. oblast optimálního chodu. Tedy oblast, ve které EOP dosahuje optimální účinnosti bez přerušení elektrického oblouku při průchodu nulou. Tato oblast, pro názornost na obrázku (24) vyšrafovaná, bude mezi přímkami účinku $\cos\varphi_{\text{Pmax}} = 0,707$ a $\cos\varphi_{0\text{max}} = 0,85$. Bude omezena kružnicemi 100% zatížení transformátoru (protože přetěžování transformátoru již není optimální chod) a také nejmenší napěťovou kružnicí. Programovací jazyk C# umožňuje pomocí třídy „graphics“ vykreslovat šrafovanou oblast mezi zadanými body. Nutno tedy nalézt průsečíky uvedených přímek a kružnic, které jsou v obrázku (24) označeny jako body A, B, C, D. Poloha bodů se zadává pomocí souřadnic $[x,y]$. Vyšrafování však nebude přesně kopírovat kružnice, mezi kterými se nachází. Hranice bude pouze sečnou mezi body CD a BA. Pro grafické znázornění to však postačuje. Tato nedokonalost by se projevila až při nastavení velkého rozdílu mezi nastavitelnými cosiny.



Obrázek 26 – Vykreslení vyšrafované oblasti

Zmíněné body lze nalézt pomocí goniometrie, zejména pak Thaletovy věty. Obrázek 27 zobrazuje polohu bodu A v kružnicovém diagramu.



Obrázek 27 - Nalezení průsečíku přímky a kružnice

Pro stanovení polohy bodu A se nejprve hledá úhel mezi osou x a přímkou účinníku $\cos \varphi = 0,707$.

$$\alpha = 90 - \arccos(0,707) (^{\circ}) \quad (74)$$

Cosinus tohoto úhlu je roven poměru mezi odvěsnou l a přeponou trojúhelníku, jejíž velikost se rovná dvojnásobku poloměru kružnice, který je znám již z vykreslování kružnic.

$$\cos \alpha = \frac{l}{2 \cdot \text{polomerUs1}} (-) \quad (75)$$

Vyjádřením a následným vynásobením délky l cosinem úhlu α dává výslednou velikost souřadnice x , jak ukazuje vztah (77). V případě souřadnice y stačí vynásobit délku l hodnotou sinu úhlu α , viz. vztah (78).

$$l = 2 \cdot \text{polomerUs1} \cdot \cos\alpha \text{ (mm)} \quad (76)$$

$$x_A = \cos\alpha \cdot l \text{ (mm)} \quad (77)$$

$$y_B = \sin\alpha \cdot l \text{ (mm)} \quad (78)$$

Výpočet pro bod B je stejný jako pro bod A s pouhým rozdílem velikosti úhlu, v tomto případě bude účinník $\cos\varphi=0,85$.

Výpočet bodu C a D je obdobný jako předchozí body A a B. Zde je již jednodušší vyjádření délky l , která zde bude rovna velikosti poloměru kružnice 100% zatížení transformátoru přepočtené na měřítko grafu. Souřadnice pro bod C v případě $\cos\varphi=0,85$ jsou

$$x_C = \sin(\arccos(0,85)) \cdot \frac{St}{\text{meritkoPQ}} \text{ (mm)} \quad (79)$$

$$y_C = 0,85 \cdot \frac{St}{\text{meritkoPQ}} \text{ (mm)} \quad (80)$$

Souřadnice pro bod D jsou v případě $\cos\varphi=0,707$

$$x = \sin(\arccos(0,707)) \cdot \frac{St}{\text{meritkoPQ}} \text{ (mm)} \quad (81)$$

$$y = 0,707 \cdot \frac{St}{\text{meritkoPQ}} \text{ (mm)} \quad (82)$$

Poslední zobrazení patří přímce zkratového proudu I_{km} . Zkratový proud nebude mít nikdy stejnou velikost, jelikož ta závisí na velikosti napětí, které se mění dle dané odbočky. Úhel přímky zkratového proudu však stejný bude, jelikož závisí na parametrech krátké cesty. Přímka zkratového proudu bude vždy vykreslena pro největší kružnici (napětí $U_{0\max}$), při které bude proud celého obvodu největší. Vycházet bude z bodu [0;0] a její konec bude kopírovat největší kružnici. Pro její vykreslení je nutné zjistit zkratovou impedanci obvodu, která se rovná sumě činných odporů a reaktance krátké sítě.

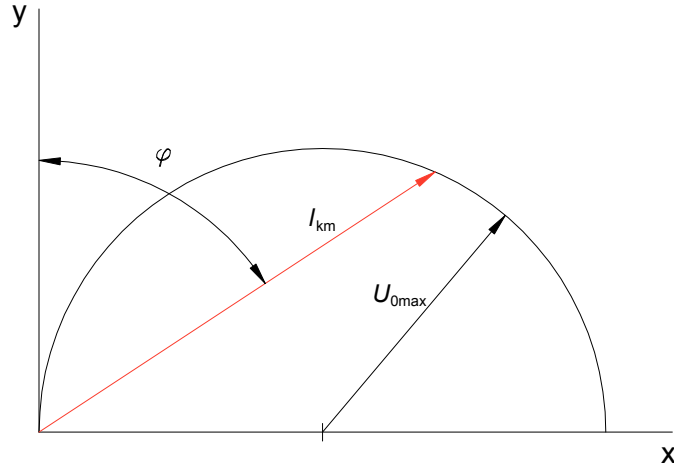
$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (83)$$

Zkratový proud vypočítáme ze vztahu (84).

$$I_{km} = \frac{U_{0max}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (A) \quad (84)$$

Tuto hodnotu je však potřeba dále přepočítat na měřítko grafu a stanovit délku přímky. Výpočet pro $meritkoIU_{0max}$ vychází ze vztahu (69).

$$meritkoIU_{0max} = \frac{\sqrt{3} \cdot meritkoPQ}{U_{0max}} \quad (A/mm) \quad (85)$$



Obrázek 28 - Obrázek pro odvození vztahů pro I_{km}

$$l = \frac{I_{km}}{meritkoIU_{0max}} \quad (mm) \quad (86)$$

Délka přímky zkratového proudu je tedy jednoduše dána vztahem (86). Pro její vykreslení je však nutno ještě znát úhel, který svírá s osami grafu. Tento úhel lze jednoduše vyjádřit z vektorového diagramu impedance.

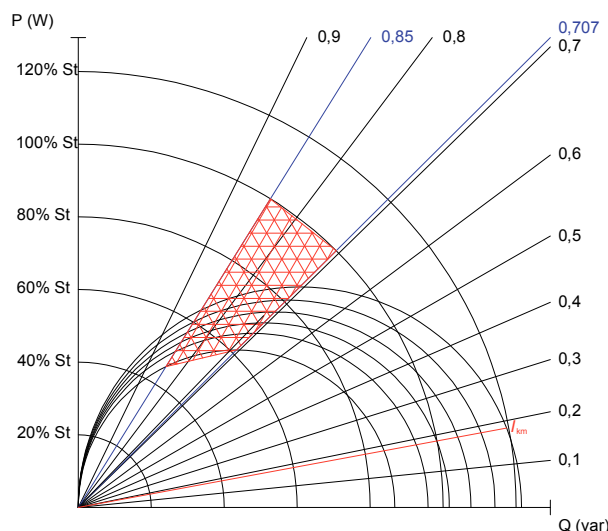
$$\cos\varphi = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (-) \quad (87)$$

Výsledný bod (konec přímky zkratového proudu) se bude pohybovat po kružnici napětí U_{0max} . Jeho souřadnice budou dle vztahu (88) a (89).

$$x_2 = \sin\varphi \cdot l \quad (mm) \quad (88)$$

$$y_2 = \cos\varphi \cdot l \quad (mm) \quad (89)$$

Vizualizaci výsledného kružnicového diagramu dle popsaného algoritmu pro jeho konstrukci vidíme na obrázku (29).



Obrázek 29 - Výsledná konstrukce kruhového diagramu

Po vykreslení kružnicového diagramu je potřeba s grafem dále pracovat. Pohybem kurzoru a měřením jeho polohy vůči hlavním výkonovým osám se budou načítat souřadnice kurzoru $[x;y]$. Vynásobením nastaveným měřítkem pro vykreslení se budou jednoduše vypočítávat hodnoty činného a jalového výkonu.

$$P = y \cdot \text{meritkoPQ} \text{ (W)} \quad (90)$$

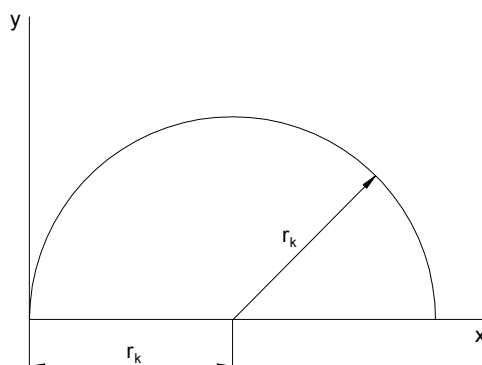
$$Q = x \cdot \text{meritkoPQ} \text{ (var)} \quad (91)$$

Z těchto hodnot se následně může jednoduše určit účinek obvodu $\cos\varphi$ a zdánlivý výkon S .

$$\cos\varphi = \arctg \frac{Q}{P} \text{ (-)} \quad (92)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ (VA)} \quad (93)$$

Složitější na odvození je odečtení napětí pro danou polohu kurzoru. Algoritmus vychází z odvození vykreslování jednotlivých napěťových kružnic a využívá poznatku, že pracovní bod dané napěťové odbočky se bude pohybovat po kružnici, která je prakticky sumou všech teoreticky vypočtených provozních bodů. Což je důvod, proč pracovní bod nemůže být umístěn mezi dvě kružnice. Velikost napětí pak bude dána poloměrem této kružnice. Vykreslené napěťové kružnice mají svůj střed umístěný na ose jalového výkonu (ose x).



Obrázek 30 - Odvození rovnice kružnice

Každá kružnice prochází bodem $[0;0]$, střed každé kružnice je tedy vzdálen od středu o svůj poloměr. V takovémto případě bude rovnice kružnice vyjádřena jako

$$(x - r_k)^2 + y^2 = r_k^2 \quad (94)$$

Následně je potřeba z této kružnice vyjádřit poloměr r_k .

$$x^2 - 2 \cdot x \cdot r_k + r_k^2 + y^2 = r_k^2 \quad (95)$$

$$r_k = \frac{x^2 + y^2}{2 \cdot x} \quad (96)$$

Poloměr r_k je roven *polomer* $U_{0(n)}$ z rovnice (70). Dosazením vztahů (68) a (69) do rovnice (70) pak lze vyjádřit hodnotu napětí pro polohu kurzoru jako

$$U_0 = \sqrt{\frac{(x^2 + y^2) \cdot 6 \cdot X_k \cdot \text{meritkoPQ}}{2 \cdot x}} \quad (97)$$

Díky tomuto vyjádření lze jednoduše spočítat proud a následně všechny parametry obvodu pro danou polohu kurzoru.

Proud obvodu $I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot \cos \varphi} \text{ (A)} \quad (98)$

Celkový odpor $R_C = \frac{P}{I^2} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (99)$

Odpor na oblouku $R_O = R_C - R_k \text{ (}\Omega\text{)} \quad (100)$

Výkon na oblouku $P_O = R_O \cdot I^2 \text{ (W)} \quad (101)$

Ztrátový výkon $P_Z = R_k \cdot I^2 \text{ (W)} \quad (102)$

$$\text{Elektrická účinnost} \quad \eta_{el} = \frac{P_0}{P} \cdot 100 (\%) \quad (103)$$

$$\text{Zatížení pecního transformátoru} \quad \beta = \frac{S}{S_T} \cdot 100 (\%) \quad (104)$$

$$\text{Zkratový proud pro odečtené napětí} \quad I_{km} = \frac{U_{0max}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} (A) \quad (105)$$

Uvedené výpočty platí i pro případné body, které do kružnicového diagramu mohou být zadány trojím způsobem. Prvním je výběr bodu přímo v grafu, postup pak bude stejný jako při zjišťování parametrů pece na základě polohy kurzoru, druhým způsobem je zadání pomocí hodnot proudu, napětí a činného výkonu. Ze vztahu (106) lze pak jednoduše vyjádřit účinník pece a dopočítat všechny parametry stejně, jako ve výše uvedeném případě.

Proud, napětí a činný výkon se měří především na sekundární straně pecního transformátoru. Fyzicky se však měří pouze proud I (např. pomocí Rogowského cívek) a napětí U (pomocí napěťových transformátorů). Činný výkon se dopočítává pomocí analogově-digitálních (dále A/D) převodníků, přičemž se vychází ze skutečností, že činný výkon není roven pouze efektivním hodnotám proudu a napětí v součinu s účinníkem pece

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos\varphi (W) \quad (106)$$

ale také, že činný výkon je roven střední hodnotě okamžitých hodnot proudu a napětí, jak uvádí vztah (107).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt (W) \quad (107)$$

Vztah (107), lze následně využít pro výpočet měření na A/D převodníků. V zjednodušené formě, bez uvažování harmonického zkreslení signálu, lze činný výkon vyjádřit jako

$$P = \frac{1}{T} \cdot \sum_{k=1}^{k=n} u_k \cdot i_k \cdot \Delta t (W) \quad (108)$$

kde T je označením periody sítě, n je počtem vzorků za periodu a Δt periodou vzorkování. Platí tedy, že perioda T je rovna součinu počtu vzorků n s periodou vzorkování Δt .

$$T = n \cdot \Delta t (s) \quad (109)$$

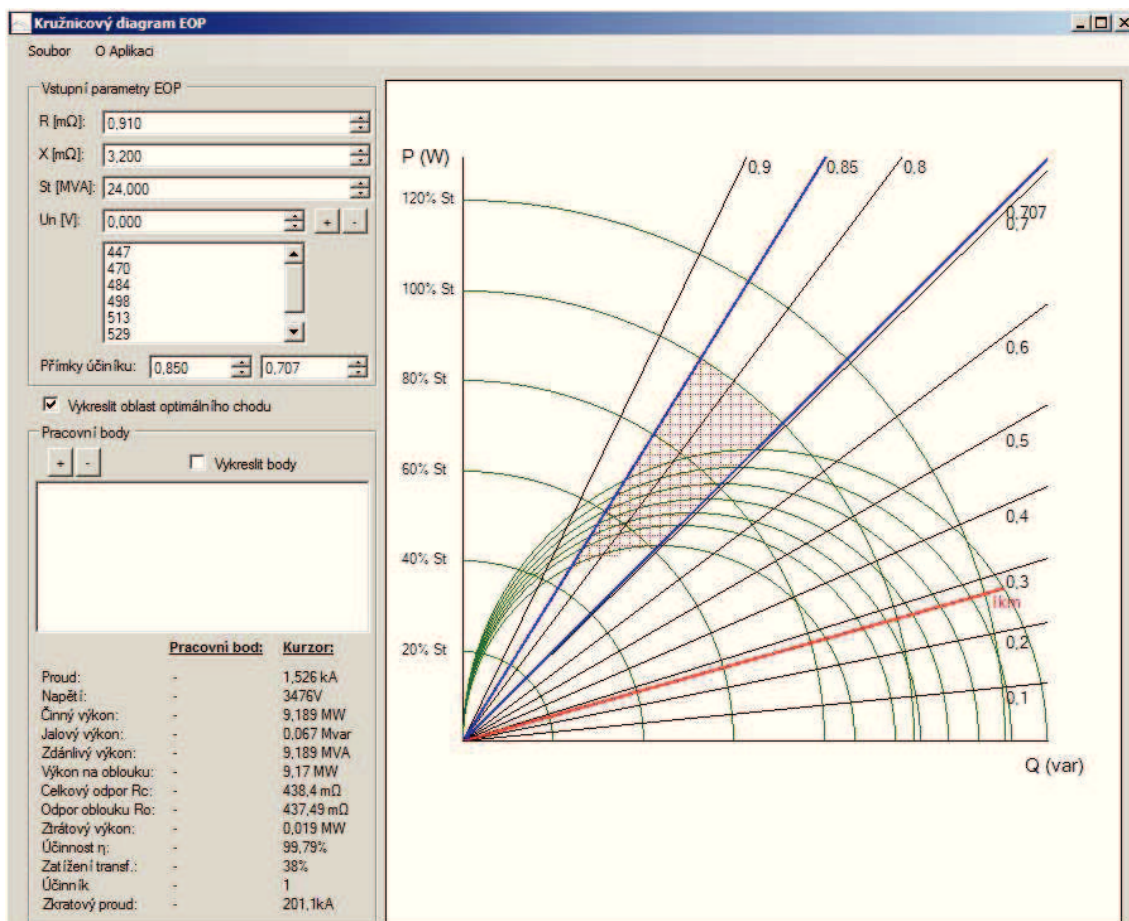
8.2 Popis programu

Na základě výše popsaného algoritmu jsem pomocí jazyka C# ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2010 vytvořil okenní aplikaci **CircleGraph.exe** pro vykreslování kružnicového diagramu, která využívá .NET Framework 4, pro spuštění programu je tedy nutné mít Framework na počítači aktualizovaný na tuto verzi.

Pokud program nelze spustit, je nutné ověřit verzi .NET Framework. Pro zjištění aktuální verze je třeba nahlédnout do registrů počítače. K tomu stačí v nabídce **Start** spustit příkaz **regedit.exe.**, čímž se spustí editor registrů, potom je potřeba zadat cestu

HKEY_LOCAL_MACHINE\SOFTWARE\Microsoft\NET Framework Setup\NDP, ve složce NDP jsou podsložky s názvy všech .NET Framework, které jsou na počítači nainstalovány.

Po spuštění aplikace se uživateli zobrazí hlavní okno programu, které je rozdělenou několika částí. V pravé části okna se nachází vykreslovací prostor pro kružnicový diagram, v levé části se pak nacházejí dva boxy, které obsahují ovládací prvky pro vykreslování. První z boxů se nazývá „Vstupní parametry EOP“. Zde uživatel zadává činný odpor R a reaktanci obvodu X EOP, obojí v jednotkách miliOhmů., dále napětí U_n napětíových odboček v jednotkách voltů (sdružené napětí), které chce uživatel zobrazit, a výkon pecního transformátoru St v jednotkách megavoltampérů. Jelikož transformátor obsahuje vždy minimálně čtyři napětíové odbočky (v praxi i osmnáct a více), lze tyto odbočky zadávat do tzv. ListBoxu pomocí ovládacího prvku pro zadávání napětí a tlačítka „+“. V případě, že je naopak potřeba jednu z napětíových odboček odebrat, stačí tuto položku vybrat v Listboxu a následně kliknout na tlačítko „-“. Při zadávání nebo změně hodnot v boxu „vstupní hodnoty EOP“ se jejich změna okamžitě projeví ve vykreslovací části. Hodnoty pro vykreslení grafu při úvodním spuštění jsou již defaultně přednastaveny. Správnost algoritmu programu potvrzuje skutečnost, že při změně činného odboru obvodu pece R se vektor zkratového proudu I_{km} pohybuje po kružnici největší napětíové odbočky. Zvyšováním tohoto odporu se přímka pohybuje směrem k nulovému bodu (průsečíku hlavních os). Tato skutečnost by měla platit i při zvyšování reaktance X obvodu EOP. Zde vektor I_{km} však naopak klesá. Nezkušený uživatel by toto mohl vyhodnotit jako chybu, avšak je nutné zdůraznit, že měřítko grafu se mění na základě reaktance obvodu X . Změnou X tedy dochází k zvětšování nebo naopak zmenšování měřítka. Pro ověření této skutečnosti postačí, když si uživatel zvolí referenční bod na jedné z výkonových os, odečte příslušný výkon a po změně reaktance X tento bod opět změří. Ověří si tak, že tento výkon pro referenční bod bude jiný.



Obrázek 31 - Hlavní okno programu kružnicového diagramu EOP

V boxu „Vstupní parametry EOP“ se dále nacházejí další dvě zadávací políčka, a to pro „Přímky účinníku“. Hodnoty uvedené defaultně v těchto políčkách představují vypočtené hodnoty účinníku obvodu při maximálním výkonu obvodu a maximálnímu výkonu na oblouku, které jsou v grafu vyznačeny modrou barvou a vymezují oblast optimálního chodu obvodu EOP. V praxi však mohou tyto hodnoty být změněny například pro rozsah oblastí při účinníku obvodu $\cos\varphi = 0,8$ až $0,65$.

Pod těmito zadávacími políčky se ještě nachází zaškrtačací políčko tzv. CheckBox s popiskem „Vykreslit oblast optimálního chodu“. Defaultně je toto políčko zaškrtnuto a v praxi zobrazuje nebo naopak skrývá vyšrafovanou oblast optimálního chodu. Velikost a omezení vyšrafované oblasti bylo popsáno v algoritmu programu.

Druhým boxem levé části hlavního okna je box nazvaný „Pracovní body“. Tento box obsahuje štítky a ListBox pro zadávání a zobrazování pracovních bodů. Pracovní body lze do tohoto boxu zadat několika způsoby. Prvním způsobem je kliknutí na tlačítko „+“, které se nachází nad boxem. Po kliknutí se zobrazí nové, menší zadávací okno s názvem „Pracovní bod“, které obsahuje tři políčka pro zadání hlavních měřených hodnot, které se u EOP měří na sekundární straně pecního transformátoru při provozu.

Obrázek 32 - Okno pro zadání pracovního bodu EOP

Zadáním takto naměřených hodnot do okna „Pracovní bod“ program údaje, po kliknutí na tlačítko „Přidat“, uloží do ListBoxu pro pracovní body. Do okna „Pracovní bod“ lze zadávat další body, a to dokud uživatel toto okno nezavře kliknutím na tlačítko „Zavřít“ nebo křížkem. Zadaný bod nebo body nejsou zatím v grafu zobrazeny a pro jejich zobrazení je potřeba zaškrtnout políčko „Vykreslit body“. Pokud je bod zadán správně, program na základě zadaných hodnot vypočte souřadnice bodu a zobrazí jej v grafu. Pokud uživatel zadá nereálné hodnoty, bod se v grafu nezobrazí. Ověřením správnosti bodu je také to, že bod bude ležet na kružnici napěťové odbočky, při které byl naměřen nebo spočítán. Dalším způsobem zadání pracovního bodu je kliknutí uživatele přímo do grafu. Pro příslušnou polohu program následně vypočte příslušný proud, napětí a činný výkon a uloží je do ListBoxu pracovních bodů. Zadávání bodu kliknutím je možné až po zaškrtnutí políčka „Vykreslit body“. Je třeba dodat, že body by měl uživatel zadávat pouze na kružnicích jednotlivých napěťových odboček. Uživatel má možnost si pro zadané body zobrazit rovněž hodnoty stavu EOP pro daný bod. Stačí v ListBoxu pro pracovní body kliknout na řádek se zadanými hodnotami bodu, který ho zajímá. Výsledky se zobrazí pod štítkem „Pracovní bod“.

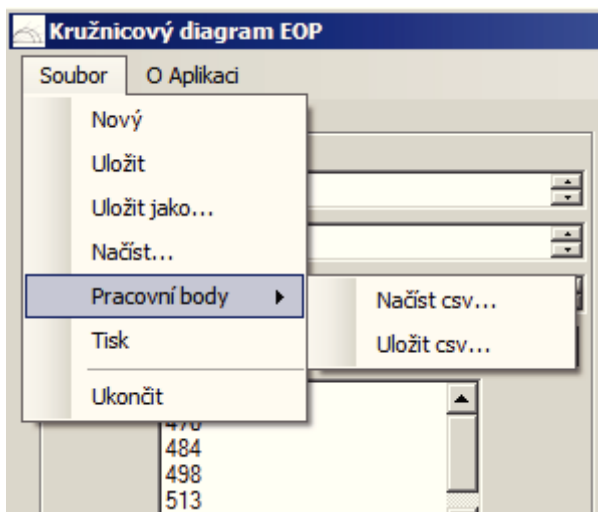
	<u>Pracovní bod:</u>	<u>Kurzor:</u>
Proud:	-	22,584 kA
Napětí:	-	465V
Činný výkon:	-	10,731 MW
Jalový výkon:	-	14,688 Mvar
Zdánlivý výkon:	-	18,191 MVA
Výkon na oblouku:	-	6,554 MW
Celkový odpor R_0 :	-	2,338 mΩ
Odpor oblouku R_0 :	-	1,428 mΩ
Ztrátový výkon:	-	4,177 MW
Účinnost η :	-	61,08%
Zatížení transf.:	-	76%
Účinník	-	0,59
Zkratový proud:	-	26,9kA

Obrázek 33 - Vyčítání hodnot z grafu a pracovních bodů

Pro navigaci v grafu, a vůbec odečítání hodnot z grafu, slouží údaje zobrazené pod štítkem „Kurzor“, který se nachází pod ListBoxem pracovních bodů. Dle polohy kurzoru myši se hodnoty stavu EOP okamžitě přepočítávají. Zde je také nutné upozornit nezkušeného uživatele, že po vykreslení pracovních bodů již není vhodné měnit vstupní parametry pece, a to zejména reaktanci obvodu X_k , a to z toho důvodu, že stejně jak bylo uvedeno výše, měřítko grafu se přepočítává na základě velikosti zmiňované reaktance X_k , která se pro obvod nemění. Její případnou změnou se

změní velikost napěťových kružnic v grafu a body již nebudou sedět na těchto kružnicích. Uživatel by mohl argumentovat, že reaktanci obvodu lze změnit zkratováním nebo přepnutím vstupní tlumivky, což je sice tvrzení správné, ale je však nutné si uvědomit, že pracovní body naměřené nebo zobrazené jsou body, které byly získány při stavu se zařazenou nebo naopak vyřazenou tlumivkou v obvodu.

V okně programu je dále také panel hlavní nabídky. Pod položkou „Soubor“ se nachází několik dalších příkazů. Příkaz „Nový“ nenávratně vymaže všechny hodnoty a vstupní parametry nastaví na nulu. Příkazem „Uložit“ nebo „Uložit jako...“ může uživatel uložit celý projekt do souboru XML, a to včetně pracovních bodů. Dalším příkazem „Načíst...“ si uživatel tyto hodnoty opětovně otevře. Další příkaz „Pracovní body“ umožňuje přístup k dalším dvěma příkazům, a to „Načíst csv...“ a „Uložit csv...“. Uživatel může do programu tedy nahrát nebo uložit data pracovních bodů, které jsou uloženy v souboru CSV. Soubor CSV neboli čárkou oddělené hodnoty (Comma-Separated Values) je soubor, který využívá řada programů pro převod tabulkových dat. Lze jej dále zpracovávat v poznámkovém bloku nebo tabulkových editorech, jakým je například Microsoft Excel. Dalším příkazem „Tisk“ lze plochu kružnicového diagramu vytisknout. Příkazem „Ukončit“ se celý program vypíná. V hlavní nabídce je také položka „O Aplikaci“, kde se nachází pouze informace o autorovi.



Obrázek 34 - Hlavní nabídka

9 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření programu pro vykreslování kružnicového diagramu elektrické obloukové pece. Pro vytvoření programu bylo nutné nastudovat a pochopit zákonitosti grafického vyjádření parametrů EOP a odvodit algoritmus, který umožní zobrazování parametrů pro zadané pracovní body. Pomocí vývojového prostředí Microsoft Visual Studio 2010, zmíněných poznatků a matematických odvození algoritmů jsem vytvořil v programovacím jazyku C# aplikaci s názvem CircleGraph.exe. Samotná aplikace je samostatným .exe souborem, který nevyžaduje instalaci a je spustitelný na všech počítačích s operačním systémem Windows, které mají aktualizovaný .NET Framework 4. Program je přílohou této práce na CD.

Pro správnou práci s programem je nutné, aby si případný uživatel nejdříve nastudoval pracovní princip elektrické obloukové pece a pochopil základní pravidla jejího kružnicového diagramů, které jsou samozřejmě popsány v kapitolách této diplomové práce. Samotné ovládání programu je jednoduché, avšak pro správné pochopení zadávání vstupních hodnot a zobrazených výsledků je také potřeba nastudovat kapitolu s popisem programu.

Program může nadále sloužit ke grafické analýze průběhu tavení v elektrických obloukových pecích nebo jako pomůcka při studiu. Může být nadále rozvíjen a doplněn o zobrazování pracovních charakteristik pro jednotlivé napěťové odbočky, vyhodnocení účinnosti celého průběhu tavby apod.

V diplomové práci jsem dále zpracoval problematiku výpočtu elektrického odporu a reaktance „krátké sítě“ EOP. Tyto výpočty je obtížné v novější oborové literatuře vyhledat, a případné příklady výpočtů mnohdy počítají s odvozenými koeficienty, jejichž zdroj se dále neuvádí. Důvodem je zřejmě dnes chráněné průmyslové „know-how“ dodavatelů technologie EOP. Dalším důvodem je, že nové pece se již nestaví stejně, jak tomu bylo v 70. letech minulého století. Starší pece však procházejí intenzifikací výrobního procesu například o dmýchání kyslíku, přidávání chemikálií, předohřevu apod. Do řídicích obvodů stávajících pecí se zavádí a instalují nové průmyslové počítače, které automaticky řídí tavbu dle předem navolených požadavků., jelikož dovolují dynamické řízení, dokážou reagovat ve velmi rychlých odezvách a zvyšují účinnost a rychlost tavby. Pro instalaci takovýchto systémů není potřeba počítat parametry krátké cesty, ale program si je sám aktualizuje na základě měření průběhu tavby.

Osobním přínosem této práce je pro mě nastudování problematiky elektrických obloukových pecí a zejména pak nemalé zkušenosti s tvorbou softwaru, které mohu dále rozvíjet a použít v budoucí praxi.

10 Literatura

- [1] MICHÁLEK, Karel. Elektrometalurgie a výroby feroslitin. Ostrava, 2008.
Dostupné z: <http://www.fmimi.vsb.cz/export/sites/fmimi/cs/urceno-pro/studenty/podklady-ke-studiu/studijni-opory/618-Michalek-Elektrometalurgie-a-vyroba-feroslitin.pdf.pdf>. Studijní opora.
- [2] RENTZ, O.; Hähre, S.; Jochum, R.; Spengler, T., Report on Best Available Techniques in the Electric Steelmaking Industry, Report on Behalf of the German Federal Environmental Agency (UBA), 1997, Karlsruhe
- [3] JONES, J.A.T., BOWMAN, B., LEFRANK P.A., Electric Furnace Steelmaking, The Making, Shaping and Treating of Steel, R.J. Fruehan, Editor. 1998, The AISE Steel Foundation: Pittsburgh. Strana 525-660
- [4] JURČA, Jaroslav. Skupina ČEZ. [Http://www.cez.cz/](http://www.cez.cz/) [online]. únor 2008 [cit. 2013-12-15].
Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/1817.html>
- [5] American Iron and Steel Institute. www.steel.org [online]. Duben 2014 [cit. 2013-04-23].
Dostupný na WWW:
<https://www.steel.org/Making%20Steel/How%20Its%20Made/Steelmaking%20Flowlines.aspx>
- [6] FREMUNT, Přemysl a Jaroslav ŠIMON. Tavení oceli v elektrických pecích. Praha: SNTL, 1984.
- [7] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [8] Katalog Demag Lichtbogenöfen. Duisburg, Demag 1975
- [9] PANKRÁČ, V.: Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice; Tlumivky v silnoproudé elektrotechnice část 2. Elektorevue [online]. 2010, roč. 2010, č. 9, s. 9-1-9-20.
Internet: <http://www.elektorevue.cz>. ISSN 1213-1539.
- [10] BENDA, Miroslav. Elektrometalurgie, skriptum, Ostrava: Vysoká škola báňská, 1989, 250 stran.
- [11] DEJL, Jaromír a Edgar WÜNSCHE. Elektrické obloukové pece. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964, 207 s.
- [12] AUTOR NEZNÁMÝ, www.spskladno.cz [online]. [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: www.spskladno.cz/stahuj.php?id=2421
- [13] KAČMÁR, Dalibor. Programujeme v COM a COM+, Computer Press, Praha, 2000

11 Přílohy na CD

- Softwarová aplikace **CircleGraph.exe**